

Раздел III. Моделирование и искусственный интеллект

УДК 658.51.011

DOI 10.23683/2311-3103-2018-2-155-163

А.В. Прибыльский, Н.Н. Чернов, А.В. Палий

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОТВОДЯЩЕГО ТЕЛА В АЭРОДИНАМИЧЕСКОМ ПОТОКЕ В ПРОЦЕССЕ КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА

Описывается численное исследование эффективности площади поверхности теплоотвода. Исследование проведено в процессоре *Fluent* универсальной программной системы конечно-элементного анализа *Ansys*, в основу которого заложены уравнения Навье-Стокса, теплопроводности и непрерывности в приближении для несжимаемой жидкости. В статье рассмотрено влияние взаиморасположения источника и приемника тепла на температуру теплонагруженного элемента. Оценена эффективность площади поверхности теплоотводящего тела. Выведено соотношение температуры поверхности тела, учитываемая эквивалентность распределения теплового поля от источника электростатическому полю заряда. Тепло распространяется при конвективном теплопереносе между твердыми телами и окружающей средой, а также и в самой среде. Естественная конвекция наблюдается в свободно движущейся среде при разности плотностей более холодных и горячих областей. В связи с этим, для более эффективного отвода тепла необходимо обеспечить безотрывное обтекание теплоотвода аэродинамическим потоком. В рабочей области, с размерами, многократно превышающими размеры теплоотводящего тела формируется плоскопараллельный аэродинамический поток. В области фиксируется точка, являющаяся источником тепловой энергии и центром масс всех исследуемых теплоотводящих тел. Торцевые стенки рабочей области являются истоком и стоком аэродинамического потока, на боковых стенках выполняется условие проскальзывания и теплоизоляции. На вход рабочей области (канала) поступает аэродинамический поток, с заданной скоростью и температурой обтекающий теплоотводящее тело с внутренним точечным источником тепла. Сегодня разнообразные вычислительные методы движения рабочего вещества прогрессируют очень быстро, однако моделирование потоков больших скоростей сопровождается с трудностями, которые являются актуальными и в настоящее время. В заключении приводится вывод о том, что из-за сужения области распространения теплового потока в теплоотводящем теле большая его часть неэффективна, что подтверждено вычислительным экспериментом в системе *Ansys Fluent*.

Численное моделирование; уравнение Навье-Стокса; уравнение теплопроводности; уравнение неразрывности; теплоотводящее тело; теплонагруженный источник; тепло-массоперенос.

A.V. Pribylsky, N.N. Chernov, A.V. Paliy

NUMERICAL SIMULATION OF THE HEAT REMOVAL BODY IN THE AERODYNAMIC FLOW IN THE PROCESS OF CONVECTIVE HEAT AND MASS TRANSFER

Numerical study of heat removal surface efficiency is described. The study was conducted in the *Fluent* processor in the universal software system of finite element analysis *Ansys*. It is based on the Navier-Stokes equations, heat conduction and continuity in the approximation for an incompressible fluid. The efficiency of the surface area of the heat removal body is estimated. We consider the influence of the relationship between the source and the heat receiver on the temperature of the heat-loaded source. Thermal energy is transferred by convective heat and mass transfer

both between a solid and the medium, and in the medium itself. The natural convection is realized when the medium moves freely due to the difference in the densities of its cold and hot regions. In this regard, for more efficient heat dissipation, it is necessary to ensure an uninterrupted flow around the heat sink by an aerodynamic flow. In the working area, with dimensions many times greater than the dimensions of the heat sink body, a plane-parallel aerodynamic flow is formed. In the region a point is fixed, which is the source of thermal energy and the center of mass of all the heat-conducting bodies under study. The end walls of the working area are the source and drain of the aerodynamic flow, on the side walls the slip condition and thermal insulation are fulfilled. At the entrance of the channel with a given speed and temperature, an air flow is flowing around the heat sink body with an internal point source of heat. Although various computational methods of working substance dynamics are currently developing quite rapidly, the modeling of currents at high speeds is fraught with difficulties that remain relevant today. We examined the ratio of the body surface temperature, taking into account the equivalence of the distribution of the thermal field from the source to the electrostatic charge field. We conclude that due to the narrowing of the area of heat flow in the heat removal body, most part of the heat removal body is ineffective. It is confirmed by the computational experiment in the Ansys Fluent system.

Numerical simulation; the Navier-Stokes equation; heat equation; the continuity equation; heat removal body; heat-loaded source; heat and mass transfer.

Введение. Тепломассопереносом называется процесс движения молекул вещества, в силу обладания кинетической энергией переносящих собою соответственно массу и тепло [1–3]. Перенос тепловой энергии конвекцией сопряжен с движением жидкости или газа, находящейся в соприкосновении с твердым телом (теплонагруженным элементом или теплоотводом) [4, 5]. Тепло передается при конвективном тепломассопереносе между твердыми телами и окружающей средой, а также и в самой среде. Естественная конвекция наблюдается при свободном движении среды при разности плотностей более холодных и горячих областей. В связи с этим, для более эффективного отвода тепла необходимо обеспечить безотрывное обтекание теплоотвода аэродинамическим потоком. С точки зрения аэродинамики тела делятся на хорошо и плохообтекаемые. Течение за плохообтекаемым телом за исключением очень малой скорости потока всегда сопровождается его отрывом. Характер обтекания таких тел особенно с гладкими контурами является слабоисследованным явлением. Сегодня различные вычислительные методы движения рабочего вещества развиваются стремительно, однако моделирование потоков при больших скоростях сопровождается трудностями, которые остаются актуальными и по сей день. Например, обтекание шара или кругового цилиндра с ростом скорости потока связано с кризисом сопротивления, обусловленного перераспределением и изменением ширины его аэродинамического следа. Также и перераспределение течения связано с переходом ламинарного пограничного слоя на поверхности тел в турбулентный режим. При проведении прямого численного моделирования данной задачи до сих пор сохраняются неразрешенные проблемы. Необходимость исследования описанных выше явлений обусловлена наличием ряда практических приложений от элементов строительных и инженерных сооружений до летательных аппаратов. По результату численного эксперимента определяется зависимость температуры теплонагруженного элемента от формы теплоотводящего тела [6–8].

Постановка задачи. В рабочей области, с размерами, многократно превышающими размеры теплоотводящего тела формируется плоскопараллельный аэродинамический поток. В области фиксируется точка, являющаяся источником тепловой энергии и центром масс всех исследуемых теплоотводящих тел. Торцевые стенки рабочей области являются истоком и стоком аэродинамического потока, на боковых стенках выполняется условие проскальзывания и теплоизоляции. На вход канала с заданной скоростью и температурой подается воздушный поток, обтекающий теплоотводящее тело с внутренним точечным источником тепла. Скорость потока соответствует числу Маха $M \ll 1$. Внешняя температура (в том числе начальная тем-

пература тела) 22 °С. Коэффициент теплопередачи медь/воздух 11,3 W/m²*С. Мощность источника 5 W. Требуется определить распределение температурного поля на поверхности тела с целью выявления неэффективных участков площади теплоотвода и области отрыва потока от поверхности тел, влияющие на температуру источника. Внешняя среда в рабочем пространстве – воздух, считается несжимаемой невесомой вязкой теплопроводной жидкостью. Обтекание симметричное (Ox – ось симметрии), режим течения – ламинарный.

Исследуемая задача описывается системой уравнений [9]:

$$\frac{\partial(\rho h_{tot})}{\partial t} - \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U h_{tot}) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \nabla \cdot (U \cdot \tau) + U \cdot (S_{M,rot} + S_{M,buoy}) + S_E;$$

$$\frac{\partial(\rho U)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \otimes U) = \nabla p + \nabla \cdot \tau + S_{M,rot} + S_{M,buoy};$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) = 0.$$

где h_{tot} – полная энтальпия при наличии вращения, ω – угловая скорость вращения жидкости, r – радиус-вектор, λ – коэффициент теплопроводности, ρ – плотность газа, p – давление, U – вектор скорости, T – температура, τ – тензор вязких напряжений, $S_{M,rot}$ – член, учитывающий силу Кориолиса и центробежную силу, $S_{M,buoy}$ – источник импульса, β – коэффициент объемного расширения; g – вектор гравитационного ускорения; S_E – источник энергии.

Теория. Для описания процесса распределения теплового поля в системе тепло-поток воспользуемся электростатической аналогией – аналогичным распространением теплового и электростатического поля от точечного источника [10–12].

Если в некоторой области создать сток тепла или заряда, обеспечивающий заданную температуру T_0 или потенциал φ_0 на расстоянии R от источника. Если сток приблизить непосредственно к поверхности тела, то температура или потенциал на поверхности тела и будет равным T_0 или φ_0 . Температура на теплонагруженном элементе станет равной сумме перепадов температур ΔT и температуры рабочей среды на поверхности теплоотводящего тела.

По сути источник тепловой мощности W и приемник тепла с той же мощностью эквивалентны в электростатической задаче зарядам $+Q$ и $-Q$ []. Так как расстояние между этими зарядами равняется d , то $Qd = p$ – дипольный момент. Поле системы двух зарядов будет называться полем диполя (рис. 1) [13, 14].

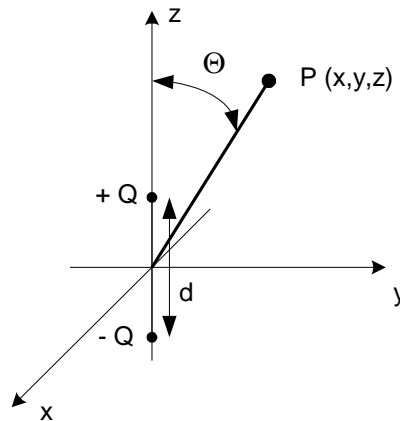


Рис. 1. Поле от двух зарядов

Потенциал данного поля равен:

$$\varphi(x, y, z) = \frac{1}{4\pi\epsilon} \cdot \frac{PCos\Theta}{r^2},$$

где Θ – угол между осью диполя и осью z .

Дипольный потенциал уменьшается как $\frac{1}{R^2}$, а потенциал точечного заряда как $\frac{1}{R}$. Электрическое поле E диполя уменьшается как $\frac{1}{R^3}$, у заряда как $\frac{1}{R^2}$.

Отличаем от линий напряженности поля точечного заряда, которые начинаются на положительном заряде и заканчиваются на бесконечности, линии поля диполя начинаются на положительном заряде и заканчиваются на отрицательном [15–18]. Это означает, что для теплового поля точечного источника вся тепловая энергия от него в установившемся режиме относится на бесконечность. Если же это диполь, то ничто на бесконечность не относится, вся тепловая энергия уходит в приемник. Также температура источника диполя по сравнению с точечным источником уменьшается.

Напряженность электрического поля (поток тепловой энергии) справа от источника будет выше, чем слева, так как напряженность электрического поля или поток тепла от источника справа будет равен уже сумме напряженностей от источника и приемника, а слева их разности.

Заменим теперь точечный источник сферой радиуса R , аналогично заряженную зарядом $+Q$.

Положительные заряды на поверхности сферического тела будут притягиваться отрицательными зарядами приемника, и плотность зарядов справа станет выше, чем слева, что только дополнительно увеличит напряженность электрического поля (поток тепла) справа сферического тела. При этом и потенциал (температура) у поверхности сферы будет различной. Температурный градиент ближе к приемнику станет выше, чем слева, ближе к источнику и соответственно, тепловой поток в теплоотводящем теле будет направлен в сторону приемника, что соответственно приведет к изменениям в распределении температурного поля вблизи источника. Таким образом, точное распределение температурного поля необходимо изменить данное распределение, как и в электростатической модели, потенциал из-за перераспределения зарядов. Подобное следует делать при помощи метода введения изображения заряда.

У двух неравных одиночных зарядов, одна из эквипотенциальных поверхностей будет являться сферой. Теперь наша задача заключается в том, чтобы подобрать положение зарядов – изображений и их необходимую величину. На поверхности заземленного сферического тела одиночный заряд будет наводить поле, схожее с одиночным зарядом в точке A (рис. 2).

Причина состоит в том, что сферическая поверхность является геометрическим местом точек P , отношение расстояний между которыми от двух заданных

точек A и B постоянно $\frac{r_2}{r_1} = -\frac{Q}{Q'}$. У нас величина поля будет определяться полями

от трех источников $-Q(W)$, $Q'(W') = \frac{R}{d}Q$ на расстоянии $\frac{R^2}{d}$, и $Q''(W'') = Q - Q'$

в центре сферы.

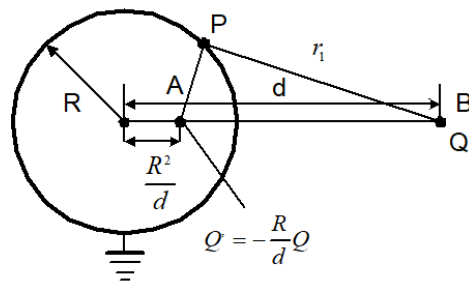


Рис. 2 - Подбор расстояния между зарядом и его изображением

Температура T_0 имеет смысл температуры окружающей среды в которой тепловая энергия и распространяется. В установившемся режиме T_0 будет иметь смысл приемника тепла имеющего температуру T_0 и расположенного в радиусе r стремящегося к бесконечности, то есть по эквипотенциальной (изотермической) поверхности, радиус которой стремится к бесконечности.

Если приемник приближать к источнику, то есть уменьшать R , то поле внутри сферического тела радиусом R не изменится, изменится только общий уровень или потенциал.

Пусть в качестве источника тепла будет взято кубическое тело. Тогда для того, чтобы распределение поля не менялось, на отдалении от источника приемник – это сферическая поверхность, вблизи это поверхность кубического тела, ну а в промежутке это нечто среднее между кубом и сферой – некий оваллоид.

Основным правилом является то, что приемник тепловой энергии должен повторять форму эквипотенциальной поверхности. В этом случае нам не придется пересчитывать заново распределение всех полей и легко находится температура источника.

Области распространения температурных полей при различных формах и расположениях приемников показаны на рис. 3.

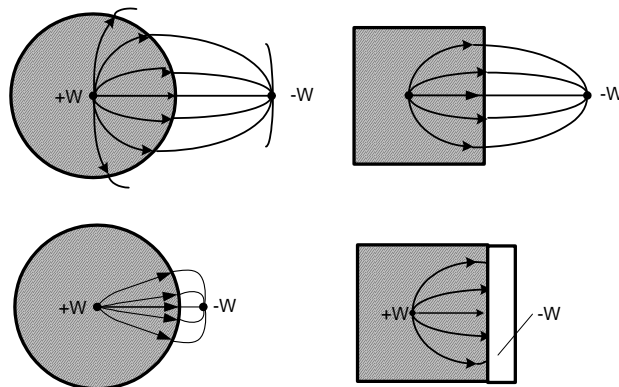


Рис. 3. Области распространения тепловых полей при различных формах и расположениях приемников

Здесь во всех четырех случаях части теплопроводящих тел, через которые не распространяется тепловой поток, следует убрать, (не учитывая аэродинамических свойств обтекания тела), при этом температура источника изменится незначительно [19, 20].

Моделирование. В программе SolidWorks были созданы трехмерные модели исследуемых теплоотводящих тел и теплонагруженного элемента.

В программе Ansys Workbench были разработаны файлы проектов, содержащие в себе все нужные комплексы, для исследования распространения температурных полей в системе тело-поток.

Посредством DesignModeller созданные геометрии были перемещены в программу Workbench, в ней же были разработаны и рабочие области, на два порядка превышающие размеры созданных объектов. Размер расчетной области $2*2*2$ м. Такой объем рабочей области позволил более наглядно оценить распределение тепловых потоков в окрестностях рассматриваемого тела.

Спроектированная геометрия рабочей области в дальнейшем была преобразована в сеточную структуру, где с помощью программного компонента Ansys Meshing была спроектирована расчетная сетка.

Созданная модель показана на рис. 4.

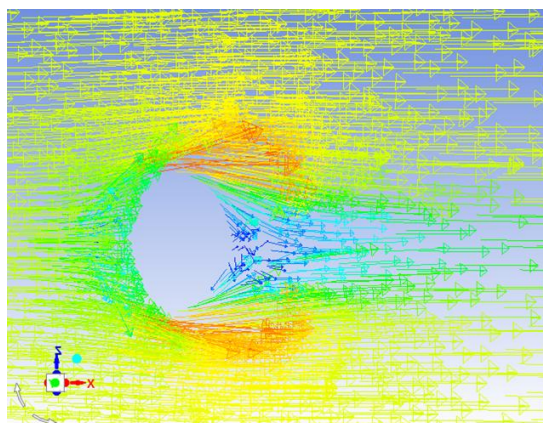


Рис. 4. Модель теплоотводящего тела с внутренним источником тепла в аэродинамическом потоке

Из рис. 4 видно, что отрыв потока от шара происходит примерно на границе левого и правого полушарий, то есть правая часть теплоотвода не обтекается потоком, то есть, задействована не вся площадь поверхности.

Основные выводы. В результате проведенного вычислительного эксперимента определялась зависимость температуры теплонагруженного элемента от формы теплоотводящего тела в конвективном потоке. Численные исследования проводились в универсальной программной системе конечно-элементного анализа Ansys Fluent, математической основой которого являются уравнения Навье-Стокса, теплопроводности и непрерывности в приближении для несжимаемой жидкости.

Для описания процесса распределения теплового поля в системе тело-поток мы воспользовались аналогией распространения теплового и электростатического полей от точечного источника.

Приведенные теоретические данные об разноэффективности зон поверхности теплоотводящего тела в конвективном потоке были подтверждены вычислительным экспериментом, который показал, что при отрыве потока от тела область тела за точкой отрыва тепло не отводит.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Цветков Ф.Ф., Григорьев Б.А.* Тепломассообмен: учеб. пособие для вузов. – 2-е изд. испр. и доп. – М.: Изд-во МЭИ, 2005. – 550 с.
2. *Ляшков В.И.* Теоретические основы теплотехники: учеб. пособие. – М.: Машиностроение – 1, 2002. – 260 с.
3. *Цветков Ф.Ф., Киримов Р.В., Величко В.И.* Задачник по тепломассообмену. – М.: Изд-во. МЭИ, 1997. – 24 с.
4. *Аметистов Е.В.* Основы теории теплообмена: учеб. пособие. – М.: МЭИ, 2000. – 247 с.
5. *Цветков Ф.Ф.* Задачник по совместным процессам тепло- и массообмена / под ред. В.И. Величко. – М.: Изд-во МЭИ, 1997. – 24 с.
6. *Цветков Ф.Ф., Салохин В.И.* Теплообмен излучением. Задачи и упражнения / под ред. В.Ю. Демьяненко. – М.: Изд-во МЭИ, 1997. – 64 с.
7. *Кутателадзе С.С.* Основы теории теплообмена. – М.: Атомиздат, 1979. – 416 с.
8. *Лутченков Л.С., Лайне В.А.* Моделирование и анализ тепловых режимов аппаратуры. – СПб.: ГУТ им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, 1995. – 355 с.
9. *Шелест В.И., Кондрашев А.С.* Концептуальный алгоритм теплофизического проектирования радиоэлектронных средств // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2003. – № 5. – С. 26-27.
10. *Охрем В.Г.* Некоторые модели стационарных термоэлектрических холодильников // ИФЖ. – 2001. – Т. 74, № 5. – С. 127-130.
11. *Моисеев В.Ф., Зайков В.П.* Влияние режима работы термоэлектрического устройства на его надежность // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2001. – № 4-5. – С. 30-33.
12. *Письменный Е.Н., Бурлей В.Д.* Влияние разрезки, поворотов и отгибки ребер на теплоаэродинамические характеристики поверхностей теплообмена // Промышленная теплотехника. – 2003. – Т. 25, № 1. – С. 10-16.
13. *Письменный Е.Н., Баранюк А.В.* Теплоотводящая поверхность с пластинчато-просечным оребрением при низкоскоростном обдуве // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2005. – № 4. – С. 43-45.
14. *Палий А.В., Замков Е.Т., Серба П.В.* Определение толщины пограничного слоя при обтекании тела аэродинамическим потоком методом электростатической аналогии // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2012. – № 1 (126). – С. 192-197.
15. *Шабаров В.В.* Применение системы ANSYS к решению гидрогазодинамических задач. – Нижний Новгород, 2006. – 108 с.
16. *Палий А.В., Замков Е.Т.* Механизм возникновения трения и сопротивления тела в газовом потоке // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2012. – № 1 (126). – С. 186-191.
17. *Палий А.В., Замков Е.Т., Булейко В.Г.* Механизм создания сопротивления плоской поверхности в газовом потоке тангенциальной составляющей скорости молекулы газа // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2013. – № 1 (138). – С. 197-202.
18. *Перепека В.И.* Некоторые вопросы контактного теплообмена элементов в РЭА // Вопросы радиоэлектроники. Сер. ТРТО. – 1968. – № 2. – С. 43-47.
19. *Палий А.В., Панатов Г.С.* Температура и теплоперенос. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2009. – 132 с.
20. *Палий А.В.* Оптимизация формы теплоотвода для теплонагруженного элемента в условиях тепломассопереноса воздуха // Тепловые процессы в технике. – 2015. – № 7. – С. 333-336.

REFERENCES

1. *Cvetkov F.F., Grigor'ev B.A.* Teplomassoobmen: ucheb. posobie dlya vuzov [Heat and mass transfer: textbook for universities]. 2nd ed. Moscow: Izd-vo MJeI, 2005, 550 p.
2. *Lyashkov V.I.* Teoreticheskie osnovy teplotekhniki: ucheb. posobie [Theoretical foundations of heat engineering: textbook]. Moscow: Mashinostroenie – 1, 2002, 260 p.
3. *Cvetkov F.F., Kirimov R.V., Velichko V.I.* Zadachnik po teplomassoobmenu [Task book on heat and mass transfer]. Moscow: Izd-vo. MJeI, 1997, 24 .
4. *Ametistov E.V.* Osnovy teorii teploobmena: ucheb. posobie [Fundamentals of heat transfer theory: tutorial]. Moscow: MJeI, 2000, 247 p.

5. *Cvetkov F.F.* Zadachnik po sovmestnym processam teplo- i massoobmena [The book combines the processes of heat and mass transfer], ed. by Velichko V.I. Moscow: Izd-vo MJeI, 1997, 24 p.
6. *Cvetkov F.F., Salokhin V.I.* Teploobmen izlucheniem. Zadachi i uprazhneniya [Heat transfer by radiation. Tasks and exercises], ed. by Dem'yanenko V.Yu. Moscow: Izd-vo MJeI, 1997, 64 p.
7. *Kutateladze S.S.* Osnovy teorii teploobmena [Fundamentals of heat transfer theory]. Moscow: Atomizdat, 1979, 416 p.
8. *Lutchenkov L.S., Layne V.A.* Modelirovanie i analiz teplovykh rezhimov apparatury [Modeling and analysis of thermal conditions of the equipment]. Saint Petersburg: GUT im. prof. M.A. Bonch-Bruevicha, 1995, 355 p.
9. *Shelest V.I., Kondrashev A.S.* Konceptual'nyy algoritm teplofizicheskogo proektirovaniya radioelektronnykh sredstv [A conceptual algorithm for thermal design of electronic equipment], *Tehnologiya i konstruirovaniye v elektronnoy apparature* [Technology and designing in electronic equipment], 2003, No. 5, pp. 26-27.
10. *Okhrem V.G.* Nekotorye modeli stacionarnykh termoelektricheskikh kholodil'nikov [Some models of stationary thermoelectric refrigerators], *IFZh* [Journal of Engineering Physics and Thermophysics], 2001, Vol. 74, No. 5, pp. 127-130.
11. *Moiseev V.F., Zaykov V.P.* Vliyanie rezhima raboty termoelektricheskogo ustroystva na ego nadezhnost' [The influence of the mode of operation of a thermoelectric device on its reliability], *Tehnologiya i konstruirovaniye v elektronnoy apparature* [Technology and design in electronic equipment], 2001, No. 4-5, pp. 30-33.
12. *Pis'mennyy E.N., Burley V.D.* Vliyanie razrezki, povorotov i otgibki reber na teploaerodinamicheskie harakteristiki poverkhnostey teploobmena [The effect of cutting, turning and bending of ribs on the heat and aerodynamic characteristics of heat exchange surfaces], *Promyshlennaya teplotekhnika* [Industrial heat engineering], 2003, Vol. 25, No. 1, pp. 10-16.
13. *Pis'mennyy E.N., Baranyuk A.V.* Teplootvodyashhaya poverkhnost' s plastinchato-prosechnym orebreniem pri nizkoskorostnom obduve [Heat-conducting surface with plate-cut finning at low-speed airflow], *Tehnologiya i konstruirovaniye v elektronnoy apparature* [Technology and design in electronic equipment], 2005, No. 4, pp. 43-45.
14. *Paliy A.V., Zamkov E.T., Serba P.V.* Opredelenie tolshhiny pogranichnogo sloya pri obtekanii tela aerodinamicheskim potokom metodom elektrostatičeskoy analogii [Determination of the boundary layer thickness during aerodynamic flow around the body by the method of electrostatic analogy], *Izvestiya YuFU. Tehnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2012, No. 1, pp. 192-197.
15. *Shabarov V.V.* Primeneniye sistemy ANSYS k resheniyu gidrogazodinamicheskikh zadach [System application ANSYS to solving water and gas flows task]. Nizhniy Novgorod, 2006, 108 p.
16. *Paliy A.V., Zamkov E.T.* Mekhanizm vozniknoveniya treniya i soprotivleniya tela v gazovom potoke [The mechanism of friction and resistance of the body in the gas stream], *Izvestiya JuFU. Tehnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2012, No.1, pp. 186-191.
17. *Paliy A.V., Zamkov E.T., Buleyko V.G.* Mekhanizm sozdaniya soprotivleniya ploskoy poverkhnosti v gazovom potoke tangencial'noy sostavlyayushhey skorosti molekuly gaza [Mechanism of creation of resistance of a flat surface in a gas stream of a tangential component of speed of a gas molecule], *Izvestiya JuFU. Tehnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2013, No. 1, pp. 197-202.
18. *Perepeka V.I.* Nekotorye voprosy kontaktного teploobmena elementov v RJeA [Some issues of pin heat transfer elements in the REA], *Voprosy radioelektroniki. Ser. TRTO* [Вопросы радиоэлектроники. Серия ТРТО], 1968, No.2, pp. 43-47.
19. *Paliy A.V., Panatov G.S.* Temperatura i teploperenos [Temperature and heat transfer]. Taganrog: Izd-vo TTI JuFU, 2009, 132 p.
20. *Paliy A.V.* Optimizatsiya formy teplootvoda dlya teplonagruzhennogo elementa v usloviyakh teplomassoperenosa vozduha [Optimization of the heat sink form for a heat-loaded element in the conditions of air heat and mass transfer], *Teplovye processy v tehnikе* [Thermal processes in engineering], 2015, No. 7, pp. 333-336.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор И.Е. Лысенко.

Палий Александр Викторович – Южный федеральный университет; e-mail: a.v._paliy@mail.ru; 347928, Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 88634371603; кафедра конструирования электронных средств; к.т.н.; доцент.

Чернов Николай Николаевич – e-mail: nik-chernov@yandex.ru; тел.: 88634371795; кафедра электрогидроакустической и медицинской техники; д.т.н.; профессор.

Прибыльский Алексей Васильевич – Государственное бюджетное профессиональное образовательное учреждение Ростовской области «Таганрогский колледж морского приборостроения»; e-mail: pribylsku.al@mail.ru; 347910, г. Таганрог, ул. Ленина 222 В, кв. 7; тел.: 89094328815; преподаватель специальных дисциплин.

Paliy Alexander Viktorovich – Southern Federal University; e-mail: a.v._paliy@mail.ru; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371603; the department of electronic apparatuses design; cand. of eng. sc.

Chernov Nikolay Nikolaevich – e-mail: nik-chernov@yandex.ru; phone: +78634371795; the department of acoustics and medical technology; dr. of eng. sc.; professor.

Prybylski Alexey Vasilevich – The State budget professional educational institution of the Rostov Region "Taganrog College of marine engineering"; e-mail: pribylsku.al@mail.ru; 347910, Taganrog, Lenina street 222, AP. 7; phone: +7909432-88-15; teacher of special subjects.

УДК 004.041

DOI 10.23683/2311-3103-2018-2-163-173

А.В. Семенова, В.М. Курейчик

АНСАМБЛЬ КЛАССИФИКАТОРОВ ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО ПОПОЛНЕНИЯ ОНТОЛОГИЙ*

Искусственный интеллект в настоящее время является одной из перспективных областей научного и практического знания. В искусственном интеллекте онтологии используются для формальной спецификации знаний. В статье предложен подход к автоматизации процесса пополнения онтологии по коллекции текстовых документов, относящихся к одной тематике. Ключевой целью работы является разработка ансамбля классификаторов для задачи автоматического пополнения онтологии предметной области. Основной задачей создания ансамбля является повышение точности прогноза агрегированного классификатора по сравнению с точностью прогнозирования каждого индивидуального базового классификатора. Для достижения поставленной цели предложен новый вариант ансамбля классификаторов, основанный на методе опорных векторов (SVM-классификатор), нейронной сети (LSTM-классификатор) и методах дистрибутивной семантики (Fasttext, word embedding), и отличающийся от известных подходов способом представления решения и возможностью формирования коллективов классификаторов. В процессе оптимизации происходит определение параметров, как отдельных классификаторов, так и всего ансамбля. Разработка ансамбля классификаторов выполнена среде Matlab с применением пакета Text Analytics Toolbox. Ансамбль классификаторов построен на наборе данных для машинного обучения Reuters-21578 (выборка новостных статей). Для обучения моделей дистрибутивной семантики выбрана обученная на Wikipedia 2014 коллекция GloVe векторов для английского языка. Сравнительное тестирование показало преимущества использования предложенного ансамбля классификаторов при работе с многомерными данными, характеризующимися большим количеством признаков. Предложенный ансамбль классификаторов может применяться для определения тематики документа, для извлечения терминов из текстовых документов и построения тезауруса. Отличительными особенностями разработанного ансамбля классификаторов являются: мягкие требования к

* Работа выполнена за счет частичного финансирования ГЗ №2.5537.2017/6.7 в ЮФУ. Грант РФФИ № 18-07-00050.