

Елаховский Дмитрий Вячеславович,

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры общей физики
ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет», г. Петрозаводск
Elahovsky@mail.ru



Конвективный теплообмен в программе физического образования студентов строительной специальности

Аннотация. Конвективный теплообмен играет важную роль в системах теплоснабжения зданий и обеспечения комфортных условий жизнедеятельности людей. Программа физического образования студентов-строителей не учитывает это обстоятельство, поэтому даже фрагментарное рассмотрение данной проблематики представляется полезным. В статье предложена корректировка методического обеспечения физического образования студентов строительной специальности за счет включения в лекционный фрагмент курса физических основ конвективного теплообмена с учетом их отсутствия в традиционных учебных планах и в рекомендуемой литературе. Также предложены альтернативные решения данной проблемы.

Ключевые слова: свободная и вынужденная конвекция, конвективный теплообмен, теплоотдача, коэффициент теплоотдачи, уравнение Ньютона – Рихмана.

Раздел: (01) отдельные вопросы сферы образования.

Необходимость рассмотрения заявленной проблематики связана со следующим обстоятельством. Теплопроводность и конвекция как основные виды теплообменных процессов играют важную роль при теплообеспечении зданий различного предназначения, обеспечении комфортных условий жизнедеятельности людей и необходимых прочностных характеристик конструктивных элементов зданий. Вследствие этого даже фрагментарное рассмотрение указанных процессов представляется полезным с точки зрения предполагаемой профессиональной деятельности студентов строительной специальности. Теплопроводность как один из видов явлений переноса рассматривается в достаточно усеченном виде в программе курса физики, при этом ее практический фрагмент фактически отсутствует. Именно это обстоятельство вызвало необходимость более детального анализа указанного явления [1–4]. Еще более тяжелая ситуация с точки зрения рассмотрения конвекционных процессов, так как в программе лекционного и практического обеспечения курса физики оно сводится только к упоминанию возможности реализации указанных процессов. Аналогичная ситуация с точки зрения рекомендованной литературы. Следует также отметить, что в учебных планах строительных факультетов университета зачастую отсутствует предмет под названием «Теплотехника». Все это вызывает необходимость корректировки методического обеспечения физического образования студентов строительной специальности. Его реализация может быть представлена следующим образом:

- конспективное изложение физических основ конвективных процессов в разделе лекционного курса физики «Термодинамика»;
- более подробное изложение данной тематики или в виде курса по выбору, или в виде дистанционного курса для самостоятельного изучения;
- рассмотрение основных аспектов конвекционных процессов на семинарских занятиях.

В данной статье с точки зрения указанной корректировки рассмотрены некоторые вопросы конвективного теплообмена.

1. Физические основы конвекционных процессов

Характерной особенностью теплопроводности как одного из теплообменных процессов является его молекулярная природа, связанная со взаимодействием молекул при их тепловом хаотическом движении и, как следствие, возникновением теплового потока между частями системы с различной температурой. В том случае, когда в силу определенных причин имеет место перемещение элементов вещества в виде неравномерно нагретых объемов жидкости или газов, возникает дополнительный перенос тепловой энергии, получивший название конвекционного процесса (от латинского слова *convectio* – «перенесение»). В ряде случаев взаимоотношение теплопроводности и конвекции носит конкурирующий характер, и именно это обстоятельство затрудняет процесс определения коэффициента теплопроводности, так как требует устранения влияния конвекции за счет специального методического обеспечения проводимого эксперимента. Но в плане обеспечения теплоснабжения зданий и уровня теплового комфорта помещений следует отметить совместную роль решения указанной проблематики, и такой объединенный вид теплообмена называется *конвективным*, и он происходит только в газах и жидкостях. Этот процесс имеет место как внутри теплоносителя (в качестве которого в основном выступает газ или жидкость), так и при наличии контакта теплоносителя с поверхностями различной формы. Классическим примером конвекции внутри теплоносителя является воздушная среда в помещениях с полами с подогревом. Конвективный теплообмен между теплоносителем и поверхностью получил название *теплоотдачи* и наиболее востребован при оценке тепловой среды помещений. Необходимый для возникновения конвективного теплообмена, массообмен реализуется в виде свободного и вынужденного режимов движения. Свободное движение связано с отличием плотностей нагретых и холодных слоев и влиянием гравитационного взаимодействия. Контакт воздуха с нагретым телом увеличивает температуру пристеночных слоев, уменьшает их плотность и тем самым обеспечивает подъем воздушной массы. Если же температура контактирующего тела ниже воздушной среды, то возникает обратный процесс движения воздушных масс вниз. Сам факт возникновения свободного движения и его кинематические характеристики связаны с теплофизическими параметрами, зависящими от вещества теплоносителя и геометрических особенностей реализации теплообменного процесса. Такой вид движения теплоносителя называется *свободной конвекцией*.

Вынужденное движение теплоносителя и, соответственно, *вынужденная конвекция* реализуются благодаря действию внешних факторов (работа насосов, вентиляторов, ветровой напор). Но и в этом случае роль свободной конвекции необходимо учитывать, особенно в том случае, когда температура внутри теплоносителя различна и скорость движения теплоносителя мала. В качестве примера вынужденной конвекции, играющей важную роль в формировании тепловой обстановки в помещениях, следует указать на воздействие ветрового напора на внешнее ограждение зданий [5]. В этом случае подходящие к теплой стенке воздушные массы приобретают некоторое количество тепловой энергии, после чего возвращаются в ядро потока и в результате перемешивания выравнивают свою температуру. Наличие трения у поверхности стенки приводит к возникновению тонкого пограничного слоя малоподвижного воздуха, в котором практически сосредоточен весь перепад температур $\Delta T = T_{\text{ст}} - T_{\text{нар}}$, при этом толщина δ этого слоя зависит от степени турбулизованности набегающего потока.

Конвекционный унос тепла всегда практически равен потоку тепла через этот пограничный слой к ядру воздушного потока:

$$j = \lambda \frac{\Delta T}{\delta} = \alpha \cdot \Delta T. \quad (1)$$

Величина $\alpha = \lambda / \delta$ носит название коэффициента теплоотдачи от стенки к наружной среде. В общем случае физически конвективный теплообмен описывается уравнением Ньютона – Рихмана:

$$dQ = \alpha (T_{\text{ж}} - T_{\text{с}}) \cdot dS. \quad (2)$$

Таким образом, тепловой поток пропорционален разности температур теплоносителя и стенки и площади теплообмена, а физический смысл коэффициента теплоотдачи – количество тепловой энергии, теряемое в единицу времени единичной поверхностью при единичной разности температур теплоносителя и поверхности. Его размерность – Вт/м² °К. Так как этот параметр в разных точках поверхности может принимать разные значения, то различают средний по поверхности и локальный коэффициенты теплоотдачи.

Исследование процессов теплоотдачи показывает их связь с характером движения теплоносителя. Различают следующие режимы: ламинарный, переходной и турбулентный. При ламинарном (слоистом) режиме частицы жидкости движутся параллельно стенке и при этом отсутствует перемешивание вещества теплоносителя. Наличие внутреннего трения приводит к переменной величине скорости в сечении, нормальному к поверхности. В случае канала круглого сечения эпюра скорости имеет параболическую форму. Перенос тепла при ламинарном режиме движения происходит в основном за счет теплопроводности и естественной конвекции. Реализация того или иного режима движения теплоносителя определяется его особой характеристикой под названием число Рейнольдса, обозначаемым символом Re. Течение теплоносителя в трубах принято считать ламинарным до $Re < 2300$ В диапазоне $2300 > Re < 10000$ имеет место переходный режим течения, а при $Re > 10000$ течение соответствует турбулентному режиму, т. е. при некотором критическом значении этого числа происходит смена режима движения. При турбулентном режиме (его еще называют вихревым) те же частицы среды имеют более сложные траектории, не совпадающие с направлением потока. В этом случае эпюра скорости имеет вид усеченной параболы, при этом теплоотдача отличается существенно большей интенсивностью по сравнению с ламинарным режимом. Различают естественную и искусственную турбулентность, во втором случае она инициируется наличием в потоке, например, каких-либо преград. Вне зависимости от указанных режимов движения пристеночная скорость теплоносителя равна нулю, увеличиваясь по мере удаления от поверхности. Различают гидродинамический пограничный (пристеночный) слой, в котором скорость изменяется от нуля до 0,9 скорости невозмущенного потока. В случае турбулентного пограничного слоя около стенки локализован достаточно тонкий слой жидкости с ламинарным характером движения. Этот слой получил название вязкого подслоя. В том случае, когда температуры стенки и теплоносителя не совпадают, вблизи стенки формируется тепловой пограничный слой, в котором в основном локализована разность температур теплоносителя.

Для процессов теплоотдачи характер движения теплоносителя играет важную роль, так как именно он ответственен за реализацию конкретного механизма теплообмена. В случае чисто ламинарного режима движения возникновение теплового потока в направлении нормали к поверхности в основном обусловлено явлением теплопроводности. Аналогична ситуация для вязкого подслоя при турбулентном режиме движения, в котором имеет место наибольшее изменение температуры, однако внутри потока перенос энергии осуществляется за счет интенсивного перемешивания частиц жидкости. Это обстоятельство приводит к тому, что интенсивность теплоотдачи в основном определяется термическим сопротивлением пристеночного подслоя, величина которого велика по сравнению с термическим сопротивлением ядра. Таким

образом, вне зависимости от режима движения теплоносителя вблизи самой поверхности применим закон Фурье:

$$dQ = - \lambda \frac{\partial T}{\partial n} dS. \quad (3)$$

В отличие от коэффициента теплопроводности, который, если не учитывать его зависимость от температуры, можно считать постоянной характеристикой конкретного материала, коэффициент теплоотдачи является достаточно сложной функцией параметров, влияющих на реализацию конвективного теплообмена. В общем случае эту зависимость можно выразить таким образом:

$$\alpha = f(c, T_c, T_{ж}, \lambda, c_p, \rho, \nu, a, \Phi, l), \quad (4)$$

где c – скорость движения теплоносителя с температурой $T_{ж}$, T_c – температура стенки, λ – коэффициент теплопроводности, ν – коэффициент кинематической вязкости, a – коэффициент температуропроводности, Φ – параметр, учитывающий форму теплоносителя, l – различные геометрические факторы.

Влияние скорости потока на коэффициент теплоотдачи проявляется в том, что увеличение скорости движения теплоносителя уменьшает толщину пограничного слоя, а это, в свою очередь, снижает его термическое сопротивление и увеличивает интенсивность теплового потока. Вязкость жидкости также влияет на толщину пограничного слоя, так как в более вязкой среде возникает более толстый слой и, как следствие, теплоотдача протекает менее интенсивно. Аналогичная ситуация при увеличении плотности среды. Теплопроводность теплоносителя влияет на термическое сопротивление ламинарной части потока, уменьшая его при увеличении коэффициента теплопроводности жидкости. Форма поверхности теплообмена и геометрические размеры влияют на формирование пограничного слоя пристеночной области. В некоторых случаях обтекаемые тела имеют достаточно большую поверхность, соответствующую ламинарному пограничному слою, что снижает теплообмен.

2. Математическое описание конвекционных процессов

Учитывая сложную зависимость коэффициента теплоотдачи от параметров теплоносителя, необходимо на базе общих законов физики установить существующие связи между величинами, влияющими на искомую характеристику конвективного теплообмена. Это достигается с помощью системы дифференциальных уравнений, решение которой позволяет выявить аналитическую зависимость коэффициента теплоотдачи как от пространственных характеристик, так и от физических свойств теплоносителя. Учитывая, что процесс теплоотдачи связан как с тепловыми, так и гидродинамическими явлениями, то в упомянутую систему дифференциальных уравнений входят уравнение теплопроводности, уравнение движения, уравнение сплошности и уравнение теплоотдачи.

1) Уравнение теплопроводности

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = a \Delta T, \quad (5)$$

где ΔT – оператор Лапласа, a – коэффициент температуропроводности. При движении жидкости (газа) имеет место конвективное изменение температуры:

$$\frac{\partial T}{\partial x} \cdot w_x + \frac{\partial T}{\partial y} \cdot w_y + \frac{\partial T}{\partial z} \cdot w_z, \quad (6)$$

где w_x, w_y, w_z – проекции скорости движения жидкости.

Данное выражение означает, что одновременно с движением жидкости с той же скоростью перемещается температурное поле, вследствие чего имеет место двойное изменение температуры в конкретных точках пространства. С учетом этого обстоятельства уравнение теплопроводности:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} + \frac{\partial T}{\partial x} w_x + \frac{\partial T}{\partial y} w_y + \frac{\partial T}{\partial z} w_z = \alpha \Delta T$$

2) Уравнение движения (уравнение Навье – Стокса)

Если рассмотреть динамическое равновесие элемента несжимаемой вязкой жидкости с учетом действующих на него сил (сила тяжести \vec{G} , сила давления \vec{P} , сила вязкости \vec{F} , сила инерции \vec{J}), то векторная сумма этих сил равна нулю:

$$g\rho + \frac{\partial P}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w_z}{\partial z^2} \right) + \rho \left(\frac{\partial w_x}{\partial \tau} + w_x \frac{\partial w_x}{\partial x} + w_y \frac{\partial w_x}{\partial y} + w_z \frac{\partial w_x}{\partial z} \right) = 0. \quad (7)$$

Более кратко это уравнение выглядит так:

$$g\rho + \text{grad}P + \mu \Delta \vec{w} + \rho(\vec{w} \cdot \text{grad})\vec{w} = 0$$

Это уравнение справедливо вне зависимости от характера движения жидкости.

3) Уравнение сплошности (непрерывности)

Данное уравнение – следствие закона сохранения массы. В общем виде это уравнение выглядит так:

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \frac{\partial (\rho w_x)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho w_y)}{\partial y} + \frac{\partial (\rho w_z)}{\partial z} = 0. \quad (8)$$

Так как для несжимаемой жидкости ее плотность постоянна, то в этом случае уравнение сплошности:

$$\frac{\partial w_x}{\partial x} + \frac{\partial w_y}{\partial y} + \frac{\partial w_z}{\partial z} = 0. \quad (9)$$

4) Уравнение теплоотдачи

Технический расчет различных теплообеспечивающих устройств связан с использованием коэффициента теплоотдачи. Совместное рассмотрение закона Фурье и закона Ньютона – Рихмана для слоя жидкости, расположенного вблизи поверхности, позволяет исходя из температурного поля определить коэффициент теплоотдачи:

$$\alpha = - \frac{\lambda}{T_c - T_{жс}} \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right)_{n \rightarrow 0}.$$

Рассмотренная система дифференциальных уравнений может быть использована для всего спектра процессов теплопередачи. Ее применение к конкретному процессу вызывает необходимость использования условий однозначности или краевых условий. Эти условия состоят [6]:

- из геометрических условий, определяющих форму и размеры системы в условиях рассматриваемого процесса;
- физических условий, характеризующих физические свойства теплоносителя и тела;
- граничных условий, описывающих особенности процесса теплообмена на границе тела;
- временных условий, связанных с характером особенностей протекания конкретного процесса во времени.

Указанные условия однозначности, как правило, задаются в различной форме например в виде числовых значений или в виде функциональных зависимостей, а также в виде таблиц. В качестве примера рассмотрим используемые условия однозначности при движении теплоносителя в трубе [7]:

1. Характер поверхности стенок трубы (гладкая, шероховатая) и ее геометрические характеристики (диаметр и длина).

2. Вид теплоносителя (воздух, вода, масла, бензол, нефть, бензин, расплавленные металлы, различные специальные смеси) и их физические свойства: плотность, удельная теплоемкость, динамический или кинематический коэффициент вязкости, коэффициент теплопроводности (в виде числовых значений или в виде функциональной зависимости от температуры).

3. Температуры теплоносителя на входе и на поверхности, его скорость на входе и у самой стенки (как правило, эта скорость равна нулю). Если указанные параметры не постоянны, необходима информация о законе их распределения по сечению трубы.

4. В случае стационарных процессов временные условия однозначности отсутствуют. Указанные условия однозначности для конкретного примера реализации конвективного теплообмена и система дифференциальных уравнений, описывающих данный процесс, составляют его математическое описание. Решение этой системы позволяет получить достаточно подробное описание процесса конвективного теплообмена, включающее в себя поля температур, скоростей, давлений и т. д.

3. Методы определения коэффициента теплоотдачи

Как уже отмечалось, коэффициент теплоотдачи зависит от многих параметров, связанных с теплофизическими характеристиками теплоносителя, его фазовым состоянием и кинематическими особенностями. Поэтому в отличие от коэффициента теплопроводности, который в условиях практического использования помещений, исключая его зависимость от температуры, считается величиной постоянной, коэффициент теплоотдачи таким свойством не обладает. В связи с этим в зависимости от конкретной ситуации используются три метода определения указанной характеристики конвективного теплообмена.

1) Экспериментальный метод

Его практическая реализация достаточно проста и основана на использовании уравнения Ньютона – Римана, в соответствии с которым коэффициент теплоотдачи равен:

$$\alpha = \frac{j}{T_{ж} - T_c}, \quad (3.11)$$

где j – плотность теплового потока, и поэтому непосредственно в эксперименте измеряются j , а также температуры теплоносителя $T_{ж}$ и поверхности теплообмена (стенки) T_c . Многократные измерения указанных величин обеспечивают достоверность конечного результата. При разработке и оптимизации эксплуатационных характеристик теплообменных установок данный метод исследования зависимости интенсивности теплоотдачи от факторов, влияющих на данную характеристику, используется достаточно широко. Достоинство экспериментального метода в первую очередь связано с достоверностью получаемой количественной информации и ее практическим применением. Однако одно обстоятельство существенно нивелирует возможности экспериментального метода, так как измеренное значение коэффициента теплоотдачи при конкретных условиях проведения эксперимента нельзя использовать в ситуациях, когда предполагаемые характеристики проектируемого теплообменного устройства даже незначительно отличаются от ранее использованных.

2) Аналитические методы

Содержание аналитических методов определения коэффициента теплообмена связано с теоретическим рассмотрением процессов в тепловом пограничном слое,

локализованном вблизи стенки, в котором, как уже отмечалось, происходит максимальное изменение температуры, и, как следствие, именно этот слой в наибольшей степени ответственен за процесс конвективного теплообмена. В результате такого рассмотрения получается система дифференциальных уравнений, число которых обеспечивает возможность получения ее общего решения. Необходимые условия однозначности при решении упомянутой системы дифференциальных уравнений позволяют рассматривать конкретные ситуации. Упомянутая система дифференциальных уравнений, как отмечалось выше, включает в себя уравнение теплопроводности, уравнение движения, уравнение сплошности и уравнение теплоотдачи. Таким образом, совокупность дифференциальных уравнений и условий однозначности для рассматриваемого теплофизического процесса определяет математическое описание данного процесса с последующим решением системы уравнений. Несмотря на кажущийся универсализм аналитического метода, его практическая реализация ограничена тем обстоятельством, что решение указанной системы дифференциальных уравнений возможно только для достаточно простых задач при условии использования ряда допущений. Это вызывает необходимость использования достоинств экспериментального метода изучения процессов теплопередачи, видоизмененного применением особой методики, обеспечивающей экстраполяцию результатов модельного эксперимента на реальные объекты родственной природы. Указанная методика основана на теории подобия.

3) Метод теплового подобия

В конспективном плане метод теплового подобия выглядит следующим образом (подробная версия указанной проблематики будет представлена в одном из номеров журнала «Концепт»).

Теория теплового подобия основана на системе понятий и правил, позволяющих осуществить перенос результатов эксперимента по определению коэффициента теплоотдачи с одних объектов на другие. Это обеспечено тем, что процессы конвективного теплообмена, имеющие место в различных теплообеспечивающих устройствах, при определенных условиях их работы могут быть подобны, а условия их реализации формулируются в виде трех теорем. Приведение дифференциальных уравнений к безразмерному виду позволяет выявить ряд безразмерных комплексов, получивших название критериев подобия. Один из них (критерий Нуссельта) содержит коэффициент теплоотдачи. Фиксированным значениям критериев соответствует весь спектр подобных конвективных процессов. Переход от обычных физических величин, описывающих конвективный теплообмен, к критериям подобия позволяет сократить число независимых переменных, необходимых для решения рассматриваемой задачи. В результате система дифференциальных уравнений, описывающих конвективный теплообмен, заменяется функциональной связью между критериями подобия в виде критериального уравнения, и если оно получено в результате имеющихся данных конкретного эксперимента, то это уравнение будет справедливо и для всей совокупности подобных процессов теплообмена в пограничном слое. Таким образом, метод теплового подобия позволяет создать теоретическую основу определения коэффициента теплоотдачи.

Ссылки на источники

1. Елаховский Д. В. Элементы архитектурной климатологии как фрагменты физического образования студентов строительной специальности университетов // Научно-методический электронный журнал «Концепт». – 2015. – № 5 (май). – С. 86–90. – URL: <http://e-koncept.ru/2015/15146.htm>.
2. Елаховский Д. В. Физические основы оценки климатической среды помещений в рамках учебного плана строительного факультета // Научно-методический электронный журнал «Концепт». – 2017. – № V11. – С. 36–42. – URL: <http://e-koncept.ru/2017/171044.htm>.

- Елаховский Д. В. Оценка температурных полей элементов строительных конструкций в программе физического образования студентов строительной специальности // Научно-методический электронный журнал «Концепт». – 2017. – № V7. – С. 13–19. – URL: <http://e-koncept.ru/2017/170154.htm>.
- Елаховский Д. В., Малиненко И. А. Физические основы архитектурной климатологии: учебное пособие для студентов-строителей / М-во образования и науки Российской Федерации; Петрозавод. гос. ун-т. – Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2008. – 102 с.: ил.
- Там же.
- Михеев М. А., Михеева И. М. Основы теплопередачи. – Изд. 2-е, стереотип. – М.: Энергия, 1977. – 344 с.
- Елаховский Д. В. Физические основы оценки климатической среды помещений ...

Dmitry Elahovsky,

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, General Physics Chair, Petrozavodsk State University, Petrozavodsk

Elahovsky@mail.ru

Convective heat exchange in the program of physical education for students of building specialty

Abstract. Convective heat exchange plays an important role in the heating systems of buildings and providing comfortable living conditions for people. The program of physical education for students specializing in building does not consider this circumstance; therefore, even a fragmentary consideration of this problem seems to be useful. The article proposes an adjustment of the methodological support of physical education for students of the building specialty due to the inclusion the physical fundamentals of convective heat exchange in the lecture fragment of the course, taking into account their absence in traditional curricula and recommended literature. Alternative solutions for this problem are also proposed here.

Key words: free and forced convection, convective heat exchange, heat transfer, heat transfer coefficient, Newton-Richman equation.

References

- Elahovskij, D. V. (2015). "Ehlementy arhitekturnoj klimatologii kak fragmenty fizicheskogo obrazovaniya studentov stroitel'noj special'nosti universitetov", *Nauchno-metodicheskij ehlektronnyj zhurnal "Koncept"*, № 5 (maj), pp. 86–90. Available at: <http://e-koncept.ru/2015/15146.htm> (in Russian).
- Elahovskij, D. V. (2017). "Fizicheskie osnovy ocenki klimaticheskoy sredy pomeshchenij v ramkah uchebnogo plana stroitel'nogo fakul'teta", *Nauchno-metodicheskij ehlektronnyj zhurnal "Koncept"*, № V11, pp. 36–42. Available at: <http://e-koncept.ru/2017/171044.htm> (in Russian).
- Elahovskij, D. V. (2017). "Ocenka temperaturnyh polej ehlementov stroitel'nyh konstrukcij v programme fizicheskogo obrazovaniya studentov stroitel'noj special'nosti", *Nauchno-metodicheskij ehlektronnyj zhurnal "Koncept"*, № V7, pp. 13–19. Available at: <http://e-koncept.ru/2017/170154.htm> (in Russian).
- Elahovskij, D. V. & Malinenko, I. A. (2008). *Fizicheskie osnovy arhitekturnoj klimatologii: uchebnoe posobie dlya studentov-stroitelej*, M-vo obrazovaniya i nauki Ros. Federacii; Petrozavod. gos. un-t, Izd-vo PetrGu, Petrozavodsk, 102 p.: il. (in Russian).
- Ibid.
- Miheev, M. A. & Miheeva, I. M. (1977). *Osnovy teploperedachi*, Izd. 2-e, stereotip., EНnergiya, Moscow, 344 p. (in Russian).
- Elahovskij, D. V. (2017). "Fizicheskie osnovy ocenki klimaticheskoy sredy pomeshchenij v ramkah uchebnogo plana stroitel'nogo fakul'teta".

Рекомендовано к публикации:

Горевым П. М., кандидатом педагогических наук, главным редактором журнала «Концепт»

Поступила в редакцию <i>Received</i>	24.10.18	Получена положительная рецензия <i>Received a positive review</i>	20.11.18
Принята к публикации <i>Accepted for publication</i>	20.11.18	Опубликована <i>Published</i>	18.01.19



www.e-koncept.ru

Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

© Концепт, научно-методический электронный журнал, 2019

© Елаховский Д. В., 2019