

либо значительным увеличением скорости, что в реальных условиях обеспечить затруднительно, либо введением в поток специального устройства – турбулизатора – с целью усреднения скоростей, а значит и температур, по сечению потока, то есть уменьшения коэффициента Кориолиса.

### Литература

1. Жилищные условия // Федеральная служба государственной статистики. – URL: [http://www.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat\\_main/rosstat/ru/statistics/population/housing/](http://www.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat_main/rosstat/ru/statistics/population/housing/).
2. Достижения науки – агропромышленному производству: мат-лы LIII Междунар. науч.-техн. конф. Ч. V / под ред. П.Г. Свечникова. – Челябинск: Изд-во ЧГАА, 2014. – 199 с.
3. Михеев М.А. Основы теплопередачи. – М.: Тип. Госэнергоиздата, 1949. – 396 с.
4. Амерханов Р.А., Драганов Б.Х. Теплотехника: учеб. для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М., 2006. – 432 с.
5. Каминер А.А., Яхно О.М. Гидромеханика в инженерной практике. – Киев: Техніка, 1987. – 175 с.



УДК 628.67

*Р.Т. Емельянов, Е.С. Турышева,  
М.А. Пылаев, М.М. Ходжаева*

### ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕПЛОПЕРЕНОСА В ОГРАНИЧЕННОМ ПРОСТРАНСТВЕ

*Рассмотрены теоретические основы конвективного теплообмена применительно к движению среды в ограниченном пространстве. Разработана система дифференциальных уравнений конвективного теплообмена для случая свободного движения в щелевых каналах.*

**Ключевые слова:** защитный пакет одежды специального назначения, конвективный теплообмен, теплопроводность, коэффициент теплоотдачи, тепловой поток, дифференциальные уравнения.

*R.T. Yemelyanov, E.S. Turysheva,  
M.A. Pylayev, M.M. Khodjaeva*

### THE RESEARCH OF THE HEAT-TRANSFER PROCESS IN THE LIMITED SPACE

*The theoretical fundamentals of the convective heat exchange in relation to the environment movement in limited space are considered. The system of differential equations of the convective heat exchange for the cases of the free movement in slot channels is developed.*

**Key words:** protective package of clothes for special purpose, convective heat exchange, heat conductivity, heat emission coefficient, thermal stream, differential equations.

**Введение.** В современной боевой одежде пожарных (БОП) необходимо применять материалы и приспособления, обеспечивающие устойчивость к воздействию теплового потока плотностью не менее 5 кВт/м<sup>2</sup> в течение 240 секунд. Коэффициент теплопроводности пакета не должен превышать значение 0,06 Вт/(мК). В связи с этим возникла необходимость в исследовании теплотехнических характеристик устройства в ограниченном пространстве, когда перенос теплоты происходит за счёт свободной конвекции.

**Цель исследования.** Теоретическое изучение процесса теплопереноса в ограниченном пространстве и построение системы дифференциальных уравнений конвективного теплообмена.

**Условия и методы исследования.** Защитный пакет предназначен для повышения уровня безопасности пожарных при тушении очагов возгорания. При этом между промежуточными слоями

боевой одежды устанавливается пакет, изготовленный из двух слоёв газонепроницаемого материала [1]. На одной стенке пакета закрепляются пружины, изготовленные из материала с памятью формы – нитинола. При повышении температуры окружающей среды слои одежды прогреваются. Пружины разворачиваются, создавая пространство между стенками пакета. Рассматриваются теоретические основы конвективного теплообмена применительно к движению среды в ограниченном пространстве.

Движение потока жидкости и газа происходит вследствие приложения внешних сил или при возникновении свободной конвекции [2]. В первом случае движение называется вынужденным – за счет насосов, вентиляторов, компрессоров, ветра и т.д. Во втором случае движение в поле земного тяготения возникает при неоднородной плотности среды и называется свободным.

В данной работе исследуется теплоотдача при свободном движении потока газа вблизи нагретой поверхности теплообмена. Температура стенки  $t_c$  принимается постоянной, т.е.  $t_c = \text{const}$ .

**Особенности теплопереноса в ограниченном пространстве.** Конвективный теплообмен происходит в вертикальной щели, образованной промежуточными слоями пакета. В зависимости от расстояния  $\delta$  между стенками щели движение потока может развиваться различным образом. При достаточно больших значениях толщины  $\delta$  около обеих стенок формируются не соприкасающиеся друг с другом пограничные слои. На горячей стенке, начиная с основания, возникает восходящий пограничный слой, на холодной – нисходящий. Отклонения от этой картины имеют место на концах щели. При малых значениях  $\delta$  оба пограничных слоя взаимодействуют друг с другом, в результате чего в канале появляются циркуляционные контуры с высотой  $h$  (рис. 1).

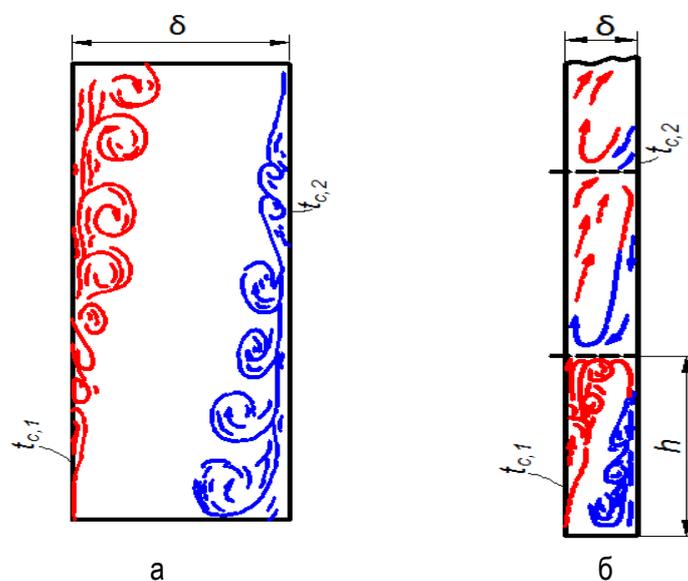


Рис. 1. Схема развития пограничных слоев: а – независимых; б – взаимодействующих

Высота контура зависит от толщины слоя, температуры стенок и физических свойств потока.

В первом случае расчёт теплообмена производится так же, как и для случая свободного движения около вертикальной пластины. С этой целью рассматривается аналитическое решение системы дифференциальных уравнений конвективного теплообмена.

Во втором случае расчет теплового потока производится с использованием уравнения теплопроводности  $\left(\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}\right)$

$$q = \frac{\lambda_{\text{экв}}(t_{c1} - t_{c2})}{\delta}, \quad (1)$$

где  $\lambda_{\text{экв}}$  – эквивалентный коэффициент теплопроводности, Вт/(м К).

Для того чтобы дать рекомендации по расчёту теплообмена в щели данной конструкции слоя БОП, требуется формирование системы дифференциальных уравнений конвективного теплообмена.

Как всякое сложное явление, конвективный теплообмен имеет свои математические зависимости, характеризующие особенности процессов переноса теплоты и гидродинамики потока. При рассмотрении используются следующие допущения: среда однородна и изотропна, физические свойства постоянны, деформация объема отсутствует, перемещение среды происходит только в поле тяготения, а иные силы, оказывающие влияние на движение среды, отсутствуют [3].

**Уравнение теплоотдачи.** Его можно получить из уравнения теплового баланса в пограничном слое вблизи стенки: тепловой поток, передаваемый путем теплопроводности через пограничный слой, равен тепловому потоку за счет конвективной теплоотдачи на границе стенка – поток

$$\text{или} \quad q_{\text{тепл}} = q_{\text{конв}} \quad (2)$$

$$-\lambda \left( \frac{\partial t}{\partial n} \right)_c = \alpha \Delta t, \quad (3)$$

откуда

$$\alpha = -\frac{\lambda}{\Delta t} \left( \frac{\partial t}{\partial n} \right)_c. \quad (4)$$

Здесь  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м К);  $\left( \frac{\partial t}{\partial n} \right)_c$  – градиент температуры,  $\frac{\text{К}}{\text{м}}$ .

Для того чтобы знать распределение температуры вблизи стенки  $\left( \frac{\partial t}{\partial n} \right)_c$ , надо использовать уравнение энергии.

**Уравнение энергии.** Используем I закон термодинамики для потока жидкости или газа

$$dQ = dH + m d \left( \frac{\omega^2}{2} \right) + dL_{\text{тех}}, \quad (5)$$

где  $dH$  – изменение энтальпии, Вт;  $m$  – массовый расход,  $\frac{\text{кг}}{\text{с}}$ ;  $\left( \frac{\omega^2}{2} \right)$  – изменение кинетической энергии,  $\frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$ ;  $dL_{\text{тех}}$  – техническая работа потока, Вт.

Анализ этого уравнения приводит к выводу: скорость значительно не изменятся, поэтому можно пренебречь изменением кинетической энергии, т.е.  $d \left( \frac{\omega^2}{2} \right) = 0$ ; в потоке не установлен ротор, и техническая работа не совершается, т.е.  $dL_{\text{тех}} = 0$ .

Тогда  $dQ = dH$ , т.е. тепловой поток равен изменению энтальпии.

В свою очередь,  $dQ$  складывается из теплового потока за счет конвекции и теплопроводности

$$dQ = dQ_{\text{конв}} + dQ_{\text{тепл}}. \quad (6)$$

Тепловой поток  $dQ_{\text{конв}} = dm \Delta h$ , где  $\Delta h$  – изменение удельной энтальпии, Дж/кг;  $\Delta h = h - h_0$ , в свою очередь,  $h_0$  – энтальпия при  $t = 0^\circ\text{C}$ , принимается как начало отсчёта энтальпии  $h_0 = 0$ .

Так как  $h = c_p t$ , то

$$dQ_{\text{конв}} = dm c_p t = d(\rho wdf) c_p t = \rho w c_p t df. \quad (7)$$

Пользуясь преобразованием Остроградского-Гаусса, можно записать

$$dQ_{\text{конв}} = - \operatorname{div}(\rho \omega c_p t) dv. \quad (8)$$

Тепловой поток за счёт теплопроводности

$$dQ_{\text{тепл}} = -\lambda \left( \frac{\partial t}{\partial n} \right)_c df = -\lambda [- \operatorname{div} \left( \frac{\partial t}{\partial n} \right)_c] dv. \quad (9)$$

Изменение энтальпии равно

$$dH = dm \frac{\partial h}{\partial \tau} = \rho dv c_p \frac{\partial t}{\partial \tau} = \rho c_p \frac{\partial t}{\partial \tau} dv. \quad (10)$$

После подстановки всех составляющих в уравнение I закона термодинамики для потока можно получить

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} + \omega_x \frac{\partial t}{\partial x} + \omega_y \frac{\partial t}{\partial y} + \omega_z \frac{\partial t}{\partial z} = a \left( \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right), \quad (11)$$

или

$$\frac{Dt}{dt} = a \nabla^2 t. \quad (12)$$

Здесь  $\frac{Dt}{dt}$  – полная или субстанциональная производная от температуры;  $a$  – коэффициент температуропроводности,  $\text{м}^2/\text{с}$ .

Для решения этого уравнения необходимо знать поле скорости вблизи стенки, поэтому следует использовать уравнение движения.

**Уравнение движения.** Получим уравнение с учетом подъемной силы.

Пусть на бесконечно малый элемент потока объемом  $dV$  и площадью  $df$  действует ряд сил, вызывающих движение:  $dF_{\text{дав}}$  – сила давления;  $dF_{\text{тр}}$  – сила трения;  $dF_{\text{под}}$  – подъемная сила;  $dF_{\text{тяж}}$  – сила тяжести (рис.2).

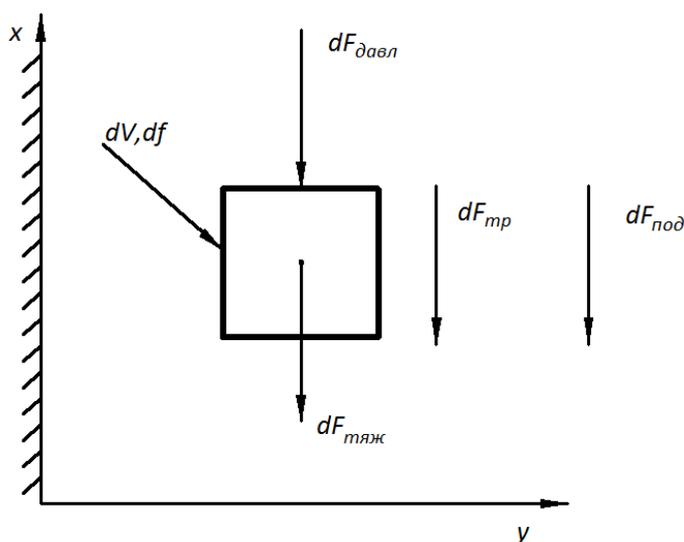


Рис. 2. К выводу уравнения движения

Равнодействующая всех сил равна сумме приложенных сил

$$dF_{\text{рав}} = dF_{\text{дав}} + dF_{\text{тяж}} - dF_{\text{тр}} - dF_{\text{под}}. \quad (13)$$

Принимается движение одномерным в направлении оси  $x$ . Тогда для всех приложенных сил можно использовать следующие выражения:

$$dF_{\text{дав}} = pdf = -\text{div}pdV = -\frac{\partial p}{\partial x}dV; \quad (14)$$

$$dF_{\text{тр}} = -\mu \frac{\partial \omega_x}{\partial y}df = +\text{div}(\mu \frac{\partial^2 \omega_x}{\partial y^2})dV; \quad (15)$$

$$dF_{\text{тяж}} = \rho g dV; \quad (16)$$

$$dF_{\text{под}} = d(\rho g \beta \Delta t f) = \rho g \beta \Delta t df = -\rho g \beta \Delta t dV. \quad (17)$$

Здесь  $\mu$  – коэффициент динамической вязкости, Па · с;  $\beta$  – коэффициент объёмного расширения, 1/К.

Равнодействующая всех сил равна массе, умноженной на ускорение

$$dF_{\text{рав}} = \rho dV \frac{D\omega_x}{dt}, \quad (18)$$

где  $\frac{D\omega_x}{dt}$  – субстанциональная производная, характеризующая изменение скорости по времени и координатам

$$\frac{D\omega_x}{dt} = \frac{\partial \omega_x}{\partial t} + \omega_x \frac{\partial \omega_x}{\partial x} + \omega_y \frac{\partial \omega_x}{\partial y} + \omega_z \frac{\partial \omega_x}{\partial z}. \quad (19)$$

Тогда для объема  $dV$  можно записать

$$\frac{D\omega_x}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + g_x - \rho_0 g_x \beta \Delta t + \nu \frac{\partial^2 \omega_x}{\partial y^2}. \quad (20)$$

**Уравнение сплошности.** Рассматриваемая задача относится к сплошной среде, поэтому необходимо уравнение сохранения массы или уравнение сплошности. Его можно получить из уравнения массового баланса: изменение массы в объёме равно притоку (оттоку) массы, то есть

$$\frac{\partial \rho dV}{\partial t} = \rho \omega df = -\text{div}(\rho \omega) dv, \quad (21)$$

или

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \omega_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho \omega_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho \omega_z)}{\partial z} = 0. \quad (22)$$

Здесь  $t$  – время, с.

Для стационарных задач  $\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$ , и при  $\rho = \text{const}$  уравнение упрощается

$$\frac{\partial \omega_x}{\partial x} + \frac{\partial \omega_y}{\partial y} + \frac{\partial \omega_z}{\partial z} = 0. \quad (23)$$

Для решения системы уравнений необходимо знать условия однозначности, то есть физические свойства потока жидкости или газа, геометрические характеристики теплоотдающей поверхно-

сти, начальные распределения температуры для нестационарных задач, а также граничные условия, определяющие теплообмен на границе стенка–поток [4].

#### Выводы

1. Для исследования конвективного переноса теплоты в защитном пакете в системе дифференциальных уравнений произведен учёт подъемной силы, возникающей при свободном движении потока.

2. Для решения системы дифференциальных уравнений необходимо использовать условия однозначности конкретного случая теплообмена, позволяющие определить коэффициенты теплоотдачи и величины тепловых потоков.

#### Литература

1. Патент на изобретение № 2495609 от 07.02.2012. Костюм боевой одежды спасателей, действующих в условиях горящих объектов при наличии летящих и падающих предметов разрушающегося объекта / *Алюбов М.Н., Прищепов Д.З., Кочетов О.С.* [и др.]. – Оpubл. 20.10.2013.
2. *Мухамедиева Л.Н., Марданов Р.Г., Новиков Д.З.* Огнетушащие газы: вопросы безопасности для человека // Системы безопасности. – 2007. – № 5. – С. 150–151.
3. Оценка опасности токсического воздействия огнетушащих газов и аэрозолей, применяемых для объемного пожаротушения: метод. пособие / МЧС РФ, ВНИИПО. – М., 2005.
4. *Чиркин В.С.* Теплофизические свойства материалов ядерной техники: справ. – М.: Атомиздат, 1968. – 484 с.



УДК 624.92

*И.О. Егорушкин, Я.А. Кунгс,  
А.И. Орленко, А.В. Юрьев*

#### ЭЛЕКТРОГИДРОИМПУЛЬСНЫЙ СПОСОБ РЕЦИКЛИНГА ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

*Предлагается способ разрушения (измельчения) железобетонных изделий с помощью установки, использующей электрогидравлический эффект. Отмечаются преимущества предлагаемой технологии по сравнению с механическими способами.*

**Ключевые слова:** электрогидроимпульсный способ, рециклинг, электрогидроэффект, утилизация, железобетонные изделия.

*I.O. Egorushkin, Ya. A. Kungs,  
A.I. Orlenko, A.V. Yuriev*

#### THE ELECTRO-HYDROIMPULSIVE METHOD OF THE FERROCONCRETE STRUCTURE RECYCLING

*The destruction method for the ferroconcrete products with the help of the device using the electro-hydraulic effect is offered. The advantages of the proposed technology in comparison with the mechanical methods are noted.*

**Key words:** electro-hydroimpulsive method, recycling, electro-hydraulic effect, utilization, ferroconcrete products.

---

**Введение.** Проблема утилизации бетонных и железобетонных (ЖБ) конструкций остро стоит во всем цивилизованном мире. По данным международной организации RILEM, в странах ЕС, США и Японии в 2000 г. ежегодный объем только бетонного лома составил более 360 млн т. Начиная с