

---

О. В. Семенович

# ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОС В ЯДЕРНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ

---

Допущено  
Министерством образования Республики Беларусь  
в качестве учебного пособия  
для студентов учреждений высшего образования  
по специальности магистратуры  
«Ядерная физика и технологии»



Минск  
«Адукацыя і выхаванне»  
2024

УДК 621.039.532(075.8)

ББК 31.49

С30

Рецензенты: кафедра «Тепловые электрические станции» БНТУ (заведующий кафедрой доктор технических наук, профессор *Н. Б. Карницкий*); заведующий отделением теплофизики Государственного научного учреждения «Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси» член-корреспондент НАН Беларуси, доктор физико-математических наук *П. С. Гринчук*

*Все права на данное издание защищены. Воспроизведение всей книги или любой ее части не может быть осуществлено без разрешения издательства.*

**ISBN 978-985-599-948-6**

© Семенович О. В., 2024

© Оформление. Республиканское унитарное предприятие «Издательство “Адукацыя і выхаванне”», 2024

# ПРЕДИСЛОВИЕ

Студентам (будущим физикам-инженерам), обучающимся на физическом факультете БГУ по специальности «Ядерная физика и технологии», дисциплины, посвященные изучению теплофизики ядерных энергетических установок, читаются в следующем формате. Все студенты слушают курс «Тепломассоперенос в ядерно-энергетических установках». Затем студентам, которые специализируются по физике ядерных реакторов и реакторных установок, читается спецкурс «Термогидродинамика переходных и аварийных режимов реакторных установок».

Целью изучения дисциплины «Тепломассоперенос в ядерно-энергетических установках» является усвоение студентами основ теории тепломассопереноса, сущности процессов гидродинамики и теплообмена в ядерных энергетических установках, в частности в ядерных реакторах при различных режимах работы, особенностей процессов гидродинамики и теплообмена в активных зонах реакторов. Задачей изучения дисциплины является формирование основных понятий, положений и концепций в области теории тепломассообмена, в том числе тепломассопереноса в ядерно-энергетических установках (ЯЭУ).

В главе 1 достаточно подробно рассмотрены основные положения теории тепломассопереноса. Вопросы теплообмена вследствие теплопроводности описаны в главе 2. Глава 3 посвящена теплообмену излучением. Конвективный тепломассообмен является предметом главы 4. Здесь же изложены базовые положения теории пограничного слоя. Цель главы 5 — познакомить с основами теории турбулентности. Большое внимание уделено вопросам моделирования турбулентности. Это объясняется в первую очередь тем, что в современной расчетной практике широко используются так называемые CFD-методы и реализующие их программные средства, которые невозможно грамотно применить, не имея хорошего представления о моделях турбулентности. Глава 6 посвящена диффузионному массообмену. Базовые сведения о кипении и конденсации представлены в главе 7. Конвективный теплообмен в многофазных средах — основные положения и наиболее распространенный в реакторной термогидродинамике метод математического описания тепломассопереноса в таких системах — рассматривается в главе 8. Базовые сведения о тепловыделении в активных зонах ядерных реакторов приведены в главе 9. В главе 10 рассматривается течение и теплообмен в трубах. Некоторые задачи термогидродинамики стержневых тепловыделяющих сборок (ТВС) описаны в главе 11.

# ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТЕОРИИ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА

## 1.1. Основные понятия термомеханики сплошных сред

Теория тепломассопереноса (тепломассообмена) заявила о себе как о самостоятельной отрасли физики в конце 40-х — начале 50-х гг. XX в. Появление этой области знания было предопределено развитием целого ряда отраслей промышленности: прежде всего атомной энергетики, авиации и ракетостроения, космической техники, химических технологий, металлургии. Насущные практические потребности делали актуальными физико-математических задачи, решение которых было невозможно в рамках только механики сплошных сред или только теории теплообмена. Необходимо решать совместно задачу переноса и массы, а также энергии в некоторой исследуемой области (часто это какое-то техническое устройство).

Механика сплошных сред — один из «китов», на которых базируется теория тепломассопереноса (во всяком случае, большая ее часть, включающая в себя и ту область, которую принято называть теплофизикой ЯЭУ). Поэтому основные понятия и положения этой отрасли физики и механики являются таковыми и в теории тепломассопереноса.

В рамках названного подхода окружающий нас материальный мир трактуется как некая сплошная среда. Определим, что мы будем понимать под этим термином. Здесь не будем сколько-нибудь оригинальными, а используем общепринятое определение [1–4].

**Сплошная среда** — физико-математическая абстракция, согласно которой материя рассматривается как система *частиц* или *материальных точек* (точечных объектов, обладающих массой), распределенных в пространстве  $E$  (трехмерном евклидовом) таким образом, что существует взаимно однозначное непрерывное отображение этой системы на пространство  $E$ : каждой точке  $z$  пространства  $E$  соответствует некоторая (и только одна) частица (материальная точка)  $\zeta$ , и наоборот, каждой частице (материальной точке)  $\zeta$  соответствует некоторая (и только одна) точка  $z$  пространства  $E$ , называемая ее *местом*.

Используя введенные в предыдущем абзаце обозначения, сформулируем это следующим образом:

$$z = X(\xi), \quad (1.1)$$

$$\xi = X^{-1}(z). \quad (1.2)$$

Совокупность материальных точек, занимающих в каждый момент времени некоторую замкнутую область пространства  $E$ , называется *телом*.

Из вышеизложенного следует, что существует взаимно однозначное непрерывное отображение тела на область пространства  $E$ . Это отображение называется *конфигурацией тела*.

При рассмотрении поведения тела во времени конфигурацию в начальный момент времени называют *исходной*, а конфигурацию в некоторый последующий момент времени — *актуальной*.

Множество  $\Omega$  всех тел называется *вселенной*.

Множество  $\Omega$  обладает структурой частично упорядоченного множества [1, 2]. Предполагается, что все тела обладают массой.

Для того чтобы иметь возможность математического описания исследуемых процессов в рамках принятого формализма, необходимо обладать некоторым средством связи физической реальности с выбранной для ее математического описания моделью пространства и времени: в нашем случае — трехмерным евклидовым пространством и действительной осью времени. Таким средством может быть система отсчета.

*Система отсчета* — группа тел, взаимное расположение которых остается неизменным в течение всего интервала времени, в который ведется наблюдение (изучение) поведения исследуемого тела или исследуемой системы тел.

Необходимо располагать математическим способом описания положения тел в пространстве и времени. Роль такого математического способа выполняет система координат.

*Система координат* — система правил, описывающих (представляющих) каждый объект (точку) некоторого класса (пространства, области пространства)  $S$  соответствующим упорядоченным набором (действительных или комплексных) чисел (компонент, координат)  $x_1, x_2, \dots, x_n$ .

Число координат, требуемых для определения каждой точки  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ , называется *размерностью* пространства  $S$ .

Заметим: система отсчета и система координат — не одно и то же. Система отсчета — совокупность материальных объектов (тел), а система координат — математический способ описания положения тел в пространстве и времени.

В дальнейшем будем иметь дело с трехмерным евклидовым пространством. Будет использоваться (как правило) декартова прямоугольная система координат, реже — цилиндрическая и сферическая.

Выбрав систему координат, конфигурацию тела  $B$  можно описать аналогично (1.1) и (1.2), задав множество радиус-векторов частиц, составляющих тело:

$$\{z^\alpha\}_B = \chi(\{\xi\}_B), \quad (1.3)$$

$$\{\xi\}_B = \chi^{-1}(\{z^\alpha\}_B). \quad (1.4)$$

Будем использовать тензорные обозначения. Как показывает практика, это делает формулы более компактными и более удобными. Для тензоров используются общепринятые обозначения (см., например, [5]). Предполагается, что свободные индексы принимают значения  $x$ ,  $y$  и  $z$  (рассматриваемое пространство трехмерное евклидово), по «немым» индексам выполняется (если специально не оговорено обратное) суммирование.

**Движение тела** – однопараметрическое семейство конфигураций, действительным параметром которого является время  $t$ :

$$\{z^\alpha\}_B = \chi(\{\xi, t\}_B), \quad (1.5)$$

$$\{\xi\}_B = \chi^{-1}(\{z^\alpha, t\}_B). \quad (1.6)$$

Тело  $B$  и любая из его пространственных конфигураций – не одно и то же. Но для наблюдения и изучения тело доступно только в своих конфигурациях.

Конфигурация тела может изменяться и вследствие его деформации.

**Деформация** (от лат. *deformatio* – искажение) – изменение взаимного положения частиц тела, связанное с их перемещением относительно друг друга (рис. 1.1).

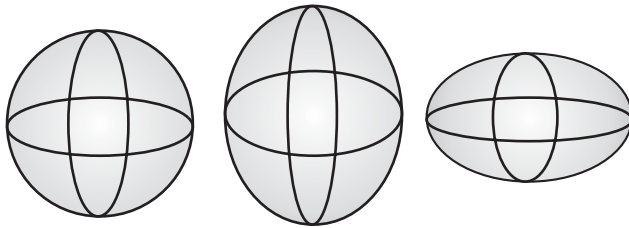


Рис. 1.1. Изменения конфигурации тела вследствие деформации

Место некоторой частицы тела в конфигурации  $\kappa$  обозначим так:

$$z_x^\alpha = \kappa(\xi). \quad (1.7)$$

Частица в точке  $z_{\kappa}^{\alpha}$  конфигурации  $\kappa$  может быть представлена следующим образом:

$$\xi = \kappa^{-1}(z_{\kappa}^{\alpha}). \quad (1.8)$$

Если  $\chi$  – движение тела, то можем записать

$$z^{\alpha} = \chi(\xi, t) = \chi_{\kappa}(z_{\kappa}^{\alpha}, t) \equiv \chi(\kappa^{-1}(z_{\kappa}^{\alpha}), t). \quad (1.9)$$

Выражение (1.9) определяет семейство деформаций по сравнению с исходной конфигурацией. Индекс  $\kappa$  указывает на то, что форма  $\chi_{\kappa}$  зависит от выбора конфигурации.

Выбрав систему координат, радиус-вектор  $z_{\kappa}^{\alpha}$  частицы  $\xi$  в начальный момент времени, когда она находится в начальной конфигурации  $\kappa_0$ , можно записать в координатах:

$$z_{\kappa_0}^{\alpha} = z_{\kappa_0 i} e_i^{\alpha}. \quad (1.10)$$

Координаты  $z_{\kappa_0}$  называются материальными координатами материальной частицы  $\xi$ .

**Материальные координаты** – координаты в начальной конфигурации.

Уравнение (1.9) можно записать в материальных координатах:

$$z^{\alpha} = \chi_{\kappa}(z_{\kappa}^{\alpha}, t) = \chi_{\kappa}(z_{\kappa}^1, z_{\kappa}^2, z_{\kappa}^3, t). \quad (1.11)$$

**Материальная (субстанциональная) производная** – это производная по времени в системе материальных координат:

$$\begin{aligned} \frac{d_m \Psi}{dt} &\equiv \left( \frac{\partial \Psi}{\partial t} \right)_{z_{\kappa}^{\alpha}} \equiv \left( \frac{\partial \Psi}{\partial t} \right)_{z_{\kappa}^1, z_{\kappa}^2, z_{\kappa}^3}; \\ \frac{D\Psi}{dt} &\equiv \left( \frac{\partial \Psi}{\partial t} \right)_{z_{\kappa}^{\alpha}} \equiv \left( \frac{\partial \Psi}{\partial t} \right)_{z_{\kappa}^1, z_{\kappa}^2, z_{\kappa}^3}. \end{aligned} \quad (1.12)$$

Здесь  $\Psi$  – некоторая физическая величина. В тождествах (1.12) использованы две несколько различные формы записи оператора материальной (субстанциональной) производной. Обе они в равной мере правомочны, как и термины «материальная производная» и «субстанциональная производная». Употребление той или иной формы и термина полностью определяется привычкой и / или пристрастием автора и никак не влияет на суть изложения. В дальнейшем будем использовать вторую (с прописной литеры  $D$ ) форму оператора и термин «субстанциональная» как чаще встречающиеся в литературе.

Выберем некоторую (не обязательно материальную) систему координат (рис. 1.2). Зафиксируем некоторую точку  $z^\alpha$  пространства (например, совпадающую с пространственным положением центра масс тела в его исходной конфигурации).

**Частная производная по времени** — производная по времени, вычисляемая в данной точке:

$$\frac{\partial \Psi}{\partial t} \equiv \Psi_{,t} \equiv \left( \frac{\partial \Psi}{\partial t} \right)_{z^\alpha} \equiv \left( \frac{\partial \Psi}{\partial t} \right)_{z^1, z^2, z^3}. \quad (1.13)$$

Если положение точки  $z^\alpha$  в выбранной системе координат совпадает с ее положением  $z_{x_0}^\alpha$  в исходной конфигурации, то частная производная по времени и субстанциональная производная совпадают в начальный момент.

В дальнейшем по мере движения точки (со скоростью  $v^\alpha$ ) эти величины становятся различными. Они соотносятся следующим образом:

$$\frac{D\Psi}{dt} \equiv \Psi_{,t} + \Psi_{,\alpha} v^\alpha \equiv \frac{\partial \Psi}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla \Psi. \quad (1.14)$$

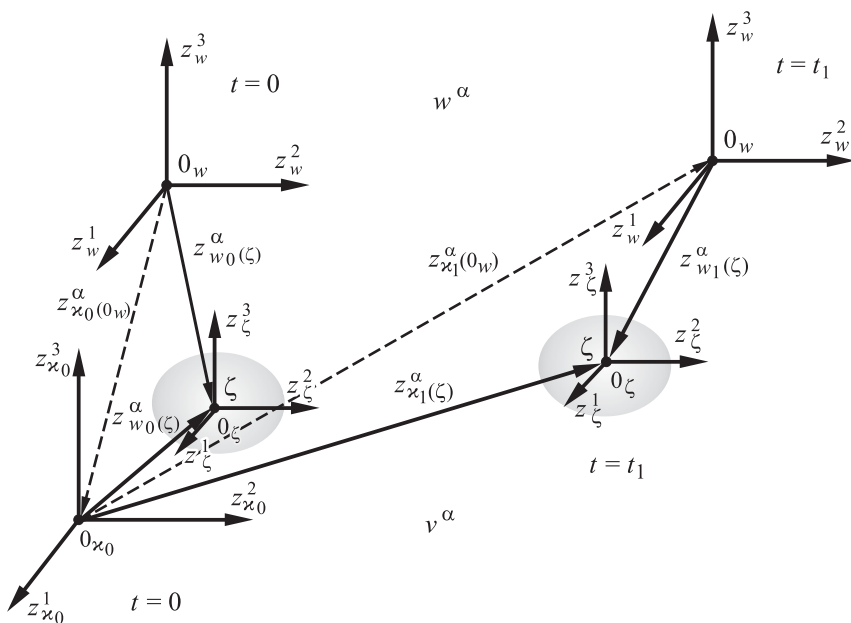


Рис. 1.2. Системы отсчета



Если  $\Psi$  – вектор (тензор 1-го порядка) или тензор 2-го порядка, выражение (1.14) принимает вид

$$\frac{D\Psi^\beta}{dt} \equiv \Psi_{,t}^\beta + \Psi_{,\alpha}^\beta v^\alpha; \quad (1.14a)$$

$$\frac{D\Psi^{\alpha\beta}}{dt} \equiv \Psi_{,t}^{\alpha\beta} + \Psi_{,\beta}^{\alpha\beta} v^\alpha. \quad (1.14б)$$

**Полная производная** – это производная по времени в системе отсчета, движущейся в системе координат выбранной системы отсчета с некоторой скоростью  $w^\alpha$ :

$$\frac{d\Psi}{dt} \equiv \Psi_{,t} + \Psi_{,\alpha} w^\alpha \equiv \frac{\partial\Psi}{\partial t} + \vec{w} \cdot \nabla\Psi. \quad (1.15)$$

Если  $\Psi$  – вектор (тензор 1-го порядка) или тензор 2-го порядка, выражение (1.14) принимает вид:

$$\frac{D\Psi^\beta}{dt} \equiv \Psi_{,t}^\beta + \Psi_{,\alpha}^\beta w^\alpha; \quad (1.15a)$$

$$\frac{D\Psi^{\alpha\beta}}{dt} \equiv \Psi_{,t}^{\alpha\beta} + \Psi_{,\beta}^{\alpha\beta} w^\alpha. \quad (1.15б)$$

Очевидно, что справедливы соотношения:

$$\frac{d\Psi}{dt} \equiv \frac{D\Psi}{dt} + \Psi_{,\alpha} (w^\alpha - v^\alpha); \quad (1.16)$$

$$\frac{D\Psi}{dt} \equiv \frac{d\Psi}{dt} + \Psi_{,\alpha} (v^\alpha - w^\alpha). \quad (1.17)$$

Частную производную функции  $\Psi$  по аргументу  $\varphi$  в дальнейшем будем обозначать  $\Psi_{,\varphi}$  [5], т. е.

$$\Psi_{,\varphi} \equiv \frac{\partial\Psi}{\partial\varphi}. \quad (1.18)$$

Каждому телу  $A$  соответствует определенная система тел  $\tilde{A}$  так, чтобы масса этих тел являлась массой вселенной. Система тел  $\tilde{A}$  называется **внешней** или **окружающей средой** для тела  $A$ .

Векторную величину  $f^\alpha(B, C)$ , характеризующую действие тела  $B$  на тело  $C$ , будем называть **силой**, с которой тело  $B$  действует на тело  $C$ .

В механике сплошной среды принимается, что все силы удовлетворяют двум аксиомам (свойствам) [1–4]. Сформулируем их.

**Аксиома С-1.** Для определенного тела  $A$  сила  $f^\alpha(C, \tilde{A})$  является аддитивной функцией, определенной для всех тел  $C$ , составляющих тело  $A$ .

Таким образом, сила, с которой тело  $A$  действует на окружающую среду  $\tilde{A}$ , есть сумма сил, с которыми на окружающую среду действуют все тела, являющиеся составными частями  $A$ .

**Аксиома С-2.** Для определенного тела  $A$  сила  $f^\alpha(A, C)$  является аддитивной функцией, определенной для всех тел  $C$ , составляющих тело  $\tilde{A}$ .

Таким образом, сила, с которой окружающая среда  $\tilde{A}$  действует на тело  $A$ , есть сумма сил, с которыми на тело  $A$  действуют все составные части окружающей среды.

Силы, с которыми приходится иметь дело в механике сплошных сред, классифицируют следующим образом: внешние, взаимные, контактные.

**Внешняя сила** — сила, возникающая (по крайней мере, от части) вне тела и действующая на материальные частицы, составляющие тело.

Внешняя сила — пространственное векторное поле. Примеры: сила тяжести, электростатическая сила между двумя заряженными телами.

Пусть  $f_e^\alpha$  — удельная (отнесенная к единице массы) внешняя сила, с которой окружающая среда  $\tilde{A}$  действует на тело  $A$ . В таком случае для суммарной внешней силы, действующей на часть  $P$  тела  $A$  (рис. 1.3), справедливо выражение

$$F_e^\alpha|_P = \int_{V_P} \rho f_e^\alpha(x^\beta) dV, \quad (1.19)$$

где  $\rho \equiv \rho(x^\alpha, t)$  — массовая плотность вещества, составляющего тело, кг/м<sup>3</sup>;  $V_P$  — объем части  $P$  тела.

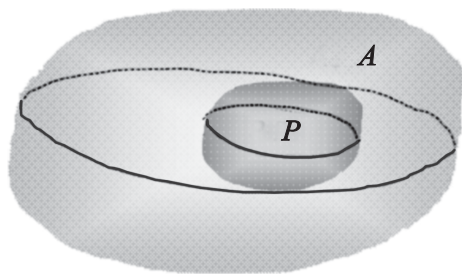


Рис. 1.3. Тело  $A$  и его часть  $P$

**Взаимная сила** — сила, возникающая внутри тела и действующая на пары материальных частиц, составляющих тело.

Взаимная сила — векторное поле, являющееся функцией материальных координат. Примеры: межмолекулярные силы, электростатическая сила между двумя заряженными телами.

Определим:

$$A \equiv (A - P) \cup P; \quad (A - P) \cap P \equiv 0. \quad (1.20)$$

Пусть  $f_m^\alpha$  – удельная взаимная сила, с которой  $(A - P)$  действует на  $P$ . Общая взаимная сила, приложенная к  $P$ , выражается так:

$$F_m^\alpha \Big|_P = \int_{V_P} \rho f_m^\alpha(x^\beta) dV. \quad (1.21)$$

Сумма взаимных сил между всеми частями тела равна нулю.

**Контактная сила** – сила, действующая на поверхности, ограничивающей часть  $P$  тела и эквивалентная силе (без учета взаимных сил!), с которой часть  $(A - P)$  тела действует на  $P$ .

Примеры: сила поверхностного натяжения, сила трения на границе раздела фаз.

Пусть  $t^\alpha \equiv t^\alpha(x^\beta, P)$  – напряжение (отнесенная к единице площади сила, Па), с которым  $(A - P)$  действует на  $P$  в точке  $x^\beta$ . В таком случае суммарная контактная сила, с которой  $(A - P)$  действует на  $P$ , равна

$$T^\alpha \Big|_P = \int_{S_P} t^\alpha(x^\beta, P) dS, \quad (1.22)$$

где  $S_P$  – площадь поверхности, ограничивающей  $P$ , м<sup>2</sup>.

В механике сплошных сред принимается верным **принцип напряжений** [1–3].

Согласно принципу напряжений существует векторная функция  $t^\alpha \equiv t^\alpha(x^\beta, n^\gamma)$ , определенная для всех точек тела  $A$  и всех единичных векторов  $n^\gamma$ , нормальных к поверхности, ограничивающей любую часть  $P$  тела  $A$ , такая, что напряжение, с которым  $(A - P)$  действует на  $P$ , можно выразить следующим образом:

$$t^\alpha(x^\beta, P) = t^\alpha(x^\beta, n^\gamma). \quad (1.23)$$

Выражение  $t^\alpha(x^\beta, n^\gamma)$  принято называть вектором напряжений [1–3].

**Вектор напряжений** – сила, действующая с напряжением  $t^\alpha(x^\beta, P)$  в точке  $x^\beta$  на ориентированный элемент ограничивающей  $P$  поверхности с внешней (направленной внутрь  $(A - P)$ ) нормалью  $n^\gamma$ .

Вектор напряжений удобно выразить через **тензор напряжений**  $\Gamma^{\alpha\beta}$ :

$$t^\alpha \equiv \Gamma^{\alpha\beta} n^\beta. \quad (1.24)$$

При задании компонент тензора  $\Gamma^{\alpha\beta}$  руководствуются следующим правилом (рис. 1.4): индекс  $\alpha$  означает координатную плоскость, нормальную оси  $\alpha$ , а индекс  $\beta$  указывает ось координат, в направлении которой действует сила.

# ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие .....	3
<b>ГЛАВА 1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТЕОРИИ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА .....</b>	<b>4</b>
1.1. Основные понятия термомеханики сплошных сред .....	4
1.2. Законы сохранения массы, импульса, момента импульса и энергии .....	14
1.2.1. Уравнения сохранения в интегральной форме .....	14
1.2.2. Теорема переноса .....	15
1.2.3. Уравнения сохранения в дифференциальной форме .....	18
1.2.4. Общие уравнения баланса .....	24
1.3. Необходимые сведения из теории подобия .....	25
1.3.1. Некоторые понятия и определения .....	25
1.3.2. Условие применимости модели «сплошной среды». Критериальное число Кнудсена .....	26
<b>ГЛАВА 2. ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ .....</b>	<b>27</b>
2.1. Основные термины .....	27
2.2. Уравнение теплопроводности .....	29
2.3. Условия однозначности .....	34
2.4. Критериальные числа, характеризующие процессы теплопроводности .....	35
2.5. Некоторые важные примеры .....	36
2.5.1. Пластина без тепловыделения .....	36
2.5.2. Пластина с постоянным тепловыделением .....	38
2.5.3. Критический диаметр тепловой изоляции .....	41
2.5.4. Теплообмен в конструкциях с оребренными поверхностями .....	43
2.5.5. Нестационарная задача теплопроводности для неограниченной пластины (граничные условия 3-го рода) .....	49
2.6. Регулярный режим теплообмена .....	57
2.7. Циклические изменения температуры .....	64
2.8. Контактный теплообмен .....	68
	315

<b>ГЛАВА 3. ТЕПЛОБМЕН ИЗЛУЧЕНИЕМ</b> .....	72
3.1. Основные термины .....	72
3.2. Законы теплового излучения .....	77
3.2.1. Закон Кирхгофа .....	77
3.2.2. Закон Стефана – Больцмана .....	78
3.2.3. Закон Ламберта .....	79
3.3. Радиационные характеристики реальных тел .....	79
3.4. Плотность теплового потока, обусловленного излучением .....	81
3.4.1. Теплообмен излучением в простых системах .....	81
3.4.2. Угловые коэффициенты .....	84
3.4.3. Коэффициент теплоотдачи излучением .....	85
<b>ГЛАВА 4. КОНВЕКТИВНЫЙ ТЕПЛОМАССОБМЕН В ОДНОФАЗНЫХ ПОТОКАХ</b> .....	86
4.1. Основные понятия и определения .....	86
4.2. Реологические уравнения (реологические законы) .....	95
4.2.1. Идеальная жидкость .....	96
4.2.2. Ньютоновская жидкость .....	97
4.3. Пограничный слой: начальные сведения .....	100
<b>ГЛАВА 5. ТУРБУЛЕНТНОСТЬ. МОДЕЛИРОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНОСТИ</b> .....	105
5.1. Турбулентность: основные понятия .....	105
5.2. Методы моделирования турбулентности: краткая характеристика .....	114
5.2.1. Метод Рейнольдса .....	114
5.2.2. Вихреразрешающие методы .....	122
5.2.3. Перспективы широкого применения в расчетной практике различных методов моделирования турбулентности .....	135
5.3. Полуэмпирические модели турбулентности .....	137
5.3.1. Уравнения Рейнольдса для ньютоновской жидкости .....	137
5.3.2. Этапы развития и классификация полуэмпирических моделей турбулентности .....	146
5.3.3. Гипотеза Буссинеска .....	147
5.3.4. Алгебраические модели турбулентности .....	150
5.3.5. Модели с одним уравнением .....	155
5.3.6. Модели с двумя уравнениями для кинетической энергии турбулентности $k$ и диссипации $\varepsilon$ .....	156

5.3.7. Модели рейнольдсовых напряжений . . . . .	160
5.3.8. Несовершенство моделей турбулентности, кризис в развитии и перспективы их использования . . . . .	161
<b>ГЛАВА 6. ДИФФУЗИОННЫЙ МАССООБМЕН . . . . .</b>	<b>163</b>
<b>ГЛАВА 7. КОНДЕНСАЦИЯ И КИПЕНИЕ . . . . .</b>	<b>173</b>
7.1. Конденсация . . . . .	173
7.1.1. Конденсация в объеме . . . . .	173
7.1.2. Конденсация на поверхности . . . . .	174
7.2. Кипение . . . . .	184
7.2.1. Кипение в объеме . . . . .	184
7.2.2. Кипение на поверхности . . . . .	185
<b>ГЛАВА 8. КОНВЕКТИВНЫЙ ТЕПЛООБМЕН В МНОГОФАЗНОЙ СРЕДЕ . . . . .</b>	<b>190</b>
8.1. Необходимые определения . . . . .	191
8.2. Современные методы описания процессов тепломассопереноса в многофазных средах . . . . .	197
8.3. Модель раздельного течения фаз . . . . .	197
8.3.1. Уравнения баланса на границе раздела фаз . . . . .	198
8.3.2. Уравнения баланса на границе раздела фаз для турбулентного потока . . . . .	209
8.3.3. Уравнения модели раздельного течения фаз . . . . .	212
<b>ГЛАВА 9. ТЕПЛО ВЫДЕЛЕНИЕ В АКТИВНЫХ ЗОНАХ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ . . . . .</b>	<b>227</b>
<b>ГЛАВА 10. ТЕЧЕНИЕ И ТЕПЛООБМЕН В ТРУБАХ . . . . .</b>	<b>235</b>
10.1. Течение в круглой трубе. Начальные сведения . . . . .	235
10.2. Гидравлические сопротивления . . . . .	239
10.2.1. Сопротивление трения . . . . .	240
10.2.2. Местные гидравлические сопротивления . . . . .	250
10.2.3. Сопротивление, обусловленное ускорением потока . . . . .	254
10.2.4. Нивелирный напор . . . . .	254
10.3. Структура однофазного турбулентного потока в круглой трубе. Универсальный профиль скорости . . . . .	254
10.4. Течение двухфазного потока в трубе . . . . .	265

10.4.1. Режимы течения	266
10.4.2. Методика Мартинелли – Нельсона	269
10.5. Теплообмен при течении в трубах	271
10.5.1. Теплоотдача при течении однофазного теплоносителя	271
10.5.2. Теплообмен в трубах при кипении	274
<b>ГЛАВА 11. ТЕРМОГИДРОДИНАМИКА СТЕРЖНЕВЫХ ТВС</b>	<b>283</b>
11.1. Методы математического моделирования термогидродинамических процессов в стержневых ТВС	284
11.1.1. Методы расчета локальной структуры потока	284
11.1.2. Приближение «пористого тела»	285
11.1.3. Субканальное приближение	285
11.2. Гидравлические сопротивления и коэффициенты теплообмена в пучках цилиндрических стержней	289
11.2.1. Гидравлические сопротивления пучков стержней	290
11.2.2. Коэффициенты теплоотдачи	293
11.3. Теплообмен при повторном заливе	295
Приложение	302
Литература	310

**Семенович О. В.**

**С30** Тепломассоперенос в ядерных энергетических установках : учебное пособие / О. В. Семенович. – Минск : Адукацыя і выхаванне, 2024. – 318 с.

ISBN 975-985-599-948-6.

Рассмотрены основные положения теории тепломассопереноса, теплопроводность, теплообмен излучением, конвективный тепломассообмен в однофазных и многофазных средах, базовые положения теории пограничного слоя. Изложены основы теории турбулентности, диффузионный массообмен, кипение и конденсация, течение и теплообмен в трубах, ряд задач термодинамики фазных тепловыделяющих сборок со стержневыми твэлами.

Адресовано студентам, обучающимся по специальности «Ядерная физика и технологии», а также будет полезно инженерам и научным сотрудникам.

**УДК 621.039.532(075.8)**

**ББК 31.49**



Учебное издание

**Семенович Олег Вячеславович**

**ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОС  
В ЯДЕРНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ**

Учебное пособие

Редактор *Т.К. Хваль*

Художественный редактор *В.А. Ярошевич*

Компьютерная верстка *И.Н. Мальшевой*

Корректор *Т.К. Хваль*

Подписано в печать 21.10.2024. Формат 60×90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 20,0. Уч.-изд. л. 19,0. Тираж 150 экз. Заказ .

Республиканское унитарное предприятие «Издательство “Адукацыя і выхаванне”».

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий № 1/19 от 02.08.2013. Ул. Будённого, 21, 220070, г. Минск.

Республиканское унитарное предприятие «Издательский центр Белорусского государственного университета». Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,

распространителя печатных изданий № 2/63 от 19.03.2014.

Ул. Красноармейская, 6, 220030, Минск.