

МЧС РОССИИ
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ГОСУДАРСТВЕННОЙ ПРОТИВОПОЖАРНОЙ СЛУЖБЫ



А.А.Кузьмин, Н.Н.Романов

СПЕЦИАЛЬНЫЕ ГЛАВЫ ТЕПЛОТЕХНИКИ

Методические указания по самостоятельному изучению
дисциплины и выполнению контрольных работ
для заочной формы обучения
по специальности 280705.65 – «Пожарная безопасность»

Санкт-Петербург, 2012

А.А. Кузьмин, Н.Н. Романов. ТЕПЛОТЕХНИКА. Методические указания по самостоятельному изучению дисциплины и выполнению контрольных работ для заочной формы обучения по специальности 280705.65 – «Пожарная безопасность» / Под ред. В.С. Артамонова. – СПб.: Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 2011. – 33 с.

Методические указания разработаны в соответствии с рабочей программой и содержит необходимые методические рекомендации по изучению курса «Специальные главы теплотехники». Приведены необходимые теоретические сведения по тематике выполняемых контрольных заданий, предлагаются варианты контрольных заданий, таблицы теплофизических параметров и перечень рекомендованной учебной литературы. Методические указания предназначены для слушателей Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России заочной и дистанционной форм обучения.

Рецензенты: **А.В. Шарков**, доктор технических наук, профессор (Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики);

Ю.Г. Баскин, доктор педагогических наук, профессор (Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России)

Под общей редакцией
Владимира Сергеевича Артамонова
*доктора военных наук, доктора технических наук, профессора,
заслуженного работника высшей школы Российской Федерации,
лауреата премии Правительства Российской Федерации
в области науки и техники*

Анатолий Алексеевич Кузьмин
кандидат педагогических наук, доцент;
Николай Николаевич Романов
кандидат технических наук, доцент

СПЕЦИАЛЬНЫЕ ГЛАВЫ ТЕПЛОТЕХНИКИ

Методические указания по самостоятельному изучению
дисциплины и выполнению контрольных работ
для заочной формы обучения
по специальности 280705.65 – «Пожарная безопасность»

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1. Теплообмен при пожарах в помещениях	9
2. Контрольные задания	11
ЗАДАНИЕ 1. Расчет среднеобъемной температуры среды в помещении при пожаре	11
ЗАДАНИЕ 2. Расчет локальных значений температуры среды в помещении при пожаре	16
ЗАДАНИЕ 3. Определение толщины защитного слоя рабочей арматуры железобетонной колонны.	18
Приложения 1	27
Приложения 2	31
Литература	33

ВВЕДЕНИЕ

В курсе «Специальные главы теплотехники» изучаются общие законы теплопередачи, а также законы теплообмена при пожаре с целью прогнозирования оперативной обстановки на пожаре, ограничения развития пожара и разработки мер по его предупреждению.

Пожар - комплекс физико-химических явлений, в основе которых лежит нестационарные (изменяющиеся во времени и пространстве) процессы горения и тепло - и массообмена.

Динамика пожара – процесс развития пожара во времени и пространстве, сопровождающийся воздействием его опасных факторов (ОФП) на окружающую среду.

Опасным называется фактор пожара, воздействие которого приводит к травме, отравлению или гибели человека, а также к материальному ущербу.

В начальной стадии развития пожара опасными для человека факторами являются: пламя, высокая температура, интенсивность теплового излучения, токсичные продукты горения, дым, снижение содержания кислорода в воздухе, поскольку при достижении определённых уровней они поражают его организм.

Все перечисленные ОФП рассматриваются как функции времени.

Для прогнозирования опасных факторов и решения соответствующих задач (оценка предела огнестойкости строительных конструкций, определение времени эвакуации людей из помещения и т.д.) необходим расчет температурного режима при пожаре в помещении, который в настоящее время может проводиться с использованием различных моделей пожаров в помещениях:

- интегральная (прогноз средних значений параметров состояния среды в помещении для любого момента развития пожара);
- зонная (прогноз размеров характерных пространственных зон, возникающих при пожаре в помещении и средних значений параметров состояния среды в этих зонах для любого момента развития пожара (приме-

ры зон - припотолочная область, восходящий на очагом горения поток нагретых газов и область незадымленной холодной зоны);

- полевая (дифференциальные) модели пожара (прогноз пространственно-временного распределения температур и скоростей газовой среды в помещении, концентраций компонентов среды, давлений и плотностей в любой точке помещения).

Реализации этих моделей является довольно сложной задачей с необходимостью использования вычислительной техники.

В данном учебном пособии излагается разработанная в ВИПТШ МВД СССР методика расчета среднеобъемных параметров состояния газовой среды при развитии пожара в помещении с прямоугольными проемами, через которые происходит естественный газообмен с окружающей средой, когда отсутствует принудительная вентиляция. В этой методике используются эмпирические формулы применимые лишь для помещений с ограждениями из кирпича и бетона.

Как уже отмечалось, одной из основных проблем является оценка огнестойкости строительных конструкций в условиях реальных пожаров. В первую очередь это связано с разнообразием физических и геометрических свойств этих конструкций, а также с областью их применения.

При воздействии пожара на строительные конструкции (СК) может происходить нарушение их целостности, потеря несущей и ограждающей способности. Способность конструкций сопротивляться воздействию пожара, сохраняя при этом свои эксплуатационные функции, называется огнестойкостью.

Расчетная оценка огнестойкости СК сводится к решению 3-ех задач:

1-ая - *определение температурного режима в помещении* (теплофизическая задача);

2-ая - *определение температурного поля в СК при пожаре в помещении и времени до наступления предельного состояния* (теплофизическая задача);

3-ья - *определение изменения несущей способности конструкций под дей-*

ствием пожара и времени до наступления предельного состояния конструкции (прочностная задача).

При расчете “пределов огнестойкости” конструкций, которые производятся с учетом “стандартного режима” пожара, необходимость в решении задачи №1 отпадает, т.к. закон изменения температуры в помещении известен.

Расчет же конструкций на огнестойкость по теплоизолирующей способности, сводится к решению двух совместных теплофизических задач - определение температурного режима в помещении и, затем, определение температуры на необогреваемой поверхности конструкции в зависимости от времени воздействия пожара.

Изменение температуры в твердых телах рассчитывают путем решения дифференциального уравнения теплопроводности Фурье. Так как у железобетонных конструкций, как правило, один размер значительно больше двух других, то решение уравнения Фурье при расчете огнестойкости достаточно проводить для одномерных и двумерных температурных полей.

Наиболее точно прогрев железобетонных конструкций определяют конечно - разностным методом. При решении уравнения теплопроводности учитывают изменение теплофизических свойств бетона.

При изучении курса «Специальные главы теплотехники» необходимо уяснить существо разбираемого вопроса и хорошо представлять его главное содержание: математическое описание явлений должно способствовать пониманию их физической сущности. Если при изучении курса у слушателей возникают вопросы, они могут получить консультацию в письменной и устной форме.

Требования к оформлению контрольной работы следующие.

1. Контрольная работа выполняется в отдельной ученической тетради четким разборчивым почерком, при этом в тетради должны быть поля, а страницы пронумерованы.

2. Графики выполняются на миллиметровой бумаге и вклеиваются в тетрадь в соответствии с выполняемым заданием.

3. При использовании уравнений, табличных значений и других справочных данных должны наличествовать ссылки на источник (название источника и автор, страница, номер уравнения, номер таблицы и др.).

4. При выполнении расчетных операций в обязательном порядке должен присутствовать комментарий, разъясняющий суть выполняемой операции, должно быть исходное уравнение, необходимые алгебраические преобразования, подстановка расчетных значений вместе с единицами измерения, математические операции, **в том числе и над единицами измерения**, ответ в виде числа и единицы измерения.

5. В конце контрольной работы приводится перечень используемой литературы, контрольная работа подписывается слушателем, проставляется дата выполнения работы.

6. В конце тетради, в которой выполняется контрольная работа, должно оставаться не менее одного чистого листа для рецензии преподавателя.

Численные значения, необходимые для выполнения индивидуального задания, зависят от номера зачетной книжки слушателя. Если номер зачетной книжки имеет один знак, например, № 1, то слева необходимо приписать 00, т. е. номер варианта 001. Если номер зачетной книжки имеет 2 знака, например, № 10, то слева необходимо приписать 0, т. е. номер варианта 010. Если номер зачетной книжки имеет 4 знака, например, № 1020, то необходимо использовать только 3 знака справа, т. е. номер варианта 020. Таким образом, любой одно- двух- и более значный номер зачетной книжки приводится к трехзначному номеру варианта выполняемого задания. Например, в числе 012 первая цифра номера варианта 0, вторая 1, последняя 2 определяют численные значения исходных параметров задания.

При выполнении контрольной работы выполняются задания 1,2 и 3.

РАЗДЕЛ. Теплообмен при пожарах в помещениях.

Тепловой баланс помещений при пожаре. Уравнения подобия теплообмена при пожарах в помещениях. Условия моделирования теплообмена при пожаре в помещении. Расчет среднеобъемных параметров состояния газовой среды при пожаре в помещении с проемами.

Изменение физических параметров при нагревании и охлаждении тел в условиях пожара. Применение аналитических решений уравнения теплопроводности для тел простейшей формы. Применение приближенных методов решения уравнения нестационарной теплопроводности.

Методические указания

Необходимо разобраться с уравнением теплового баланса помещений при пожаре, а именно - как определяется количество тепла, выделяемое при пожаре, от чего оно зависит и на нагрев чего расходуется это выделившееся тепло. Надо иметь в виду, что результаты расчета изменения температуры продуктов горения во времени по рассматриваемой методике для многих твердых сгораемых материалов будут существенно иными, особенно в начальной стадии развития пожара. Однако, для древесины в виде штабелей из брусков характер изменения температуры во времени остается практически таким же, как и при горении жидкостей с открытой поверхности.

Нужно понять значение закона Фурье для решения задач нестационарной теплопроводности. Усвойте, что физически теплопроводность представляет собой процесс распространения теплоты путем теплового движения микрочастиц вещества без визуально наблюдаемого перемещения самих частиц.

Уясните назначение и состав условий однозначности при решении задач теплообмена. Поймите влияние рода граничных условий на решение уравнения теплопроводности при нестационарном режиме. Разберитесь, как, применяя граничное условие первого рода, получают решение по распространению температуры внутри тела, а применяя граничное условие

третьего рода, получают решение по передаче теплоты от горячего носителя к холодному через разделяющую их стенку (теплопередача).

Конечная цель решения задач нестационарной теплопроводности — определение теплового потока и распределение температур внутри тела. Разберитесь в том, как надо правильно подбирать материалы теплоизоляции ограждающих конструкций. Уясните, почему критерии Bi и Fo определяют нестационарную теплопроводность при нагревании и охлаждении тела.

РАСЧЕТ СРЕДНЕОБЪЕМНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ СРЕДЫ В ПОМЕЩЕНИИ ПРИ ПОЖАРЕ

ЗАДАНИЕ №1

Производство, связанное с обращением ГЖ, размещено в помещении размерами $a \cdot b$, м. и высотой H , м. При аварии технологических аппаратов возможен розлив жидкости на пол и соответственно, возникновение пожара. При возможной аварии, предусмотрены устройства, ограничивающие растекание жидкости на полу площадью не более f , m^2 . Расстояние от предполагаемой границы горения до стены с оконными и дверными проемами, через которые будет происходить газообмен при пожаре с внешней средой, l , м.

Механическая вентиляция при возникновении пожара выключается. За счет естественного газообмена в помещение поступает такое количество воздуха, что на 1 кг горящей жидкости в среднем приходится V_A , m^3 воздуха.

Рассчитайте возможную среднюю объемную температуру среды в помещении при возникновении пожара через **2, 5, 10, 20** и **30** мин его развития.

Постройте график изменения средней объемной температуры среды в помещении при пожаре во времени.

Исходные данные для выполнения расчета приведены в таблицах 1.1 – 1.3 .

Результаты расчета представить в виде таблицы 1.4 и графика.

Исходные данные для расчета

Таблица 1.1

Первая цифра № варианта	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Жидкость	Ацетон	Бензин	Бензол	Диэтило- вый эфир	Толуол	Бензин	Ксилол	Метило- вый спирт	Амило- вый спирт	Бутило- вый спирт

Таблица 1.2

Вторая цифра № варианта	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$f, \text{м}^2$	98	116	140	120	60	82	130	84	110	80
$V_A, \text{м}^3/\text{кг}$	10	16	20	16	12	7	22	12	16	14

Таблица 1.3

Третья цифра ва- рианта	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
a, м	58	52	46	36	58	52	46	36	30	36
b, м	60	66	72	72	66	54	78	54	72	60
H, м	12	12	15	18	15	9	18	12	9	9
l, м	24	26	32	30	26	25	30	22	35	28

Время, мин.	2	5	10	20	30
$T_{m,\tau}$, К					

ПОЯСНЕНИЯ К РЕШЕНИЮ ЗАДАНИЯ

Расчет возможного температурного режима при пожаре в помещении выполняется с целью установления:

а) действительного предела огнестойкости строительных конструкций; б) времени эвакуации людей из помещения; в) времени срабатывания датчиков пожарной автоматики и в других случаях.

Среднеобъемная температура среды в помещении при пожаре для любого заданного момента времени τ от начала его развития:

$$T_{m,\tau} = 0,66 T_a (\eta B C_p V_r / \sigma_0 \epsilon_{пр} F T_a^3)^{0,17},$$

где T_a – температура продуктов горения, К

$$T_a = (\eta Q_p^n / C_p V_r) + 273$$

Здесь η – коэффициент полноты горения ($\eta = 1$);

Q_p^n - теплота сгорания жидкости, Дж/кг (приложение 1);

V_r – приведенный действительный объем продуктов горения, образующихся при сгорании 1 кг жидкости и коэффициенте избытка воздуха α_m , м³/кг

$$V_r = V_r^\circ + V_0(\alpha_m - 1),$$

V_r° – объем продуктов горения, образующихся при сгорании 1 кг горючей жидкости и теоретически необходимом количестве воздуха, м³/кг (приложение 2); V_0 – количество воздуха, необходимого для полного сгорания 1 кг горючей жидкости, м³/кг (приложение 2); α_m - коэффициент избытка воздуха, вычисляется по формуле

$$\alpha_m = V_A/V_o,$$

V – масса жидкости, сгорающей при пожаре за секунду (расход горючей жидкости) кг/с

$$V = M_o[0,3+0,7 \cdot (\tau/30)^{0,5}]f,$$

где M_o – массовая скорость выгорания жидкости, кг/(м²·с) (приложение 2); τ – время, отсчитываемое от начала пожара, мин; C_p – объемная теплоемкость продуктов горения при постоянном давлении, Дж/(м³·К)

$$C_p = 1250 + [0,12 + 0,1/(0,25 + \alpha_m)]T_{m,\tau}.$$

$\sigma_0 = 5,7 \cdot 10^{-8}$ - константа излучения абсолютного черного тела, Вт/(м²·К);

$\epsilon_{пр}$ - приведенная степень черноты системы «среда – поверхность ограждения»

$$\epsilon_{пр} = 1/[1 + 0,0022(T_{m,\tau} - 273)],$$

F – площадь поверхностей теплообмена, м²

$$F = 2(\alpha + b)H + 2a \cdot b.$$

Для расчета среднеобъемной температуры в помещении при пожаре необходимо знать значения приведенной степени черноты $\epsilon_{пр}$ и объемной теплоемкости C_p . Значения этих физических величин, как видно, являются функцией искомой температуры. Такие задачи решаются методом последовательных приближений.

Задаваясь значением искомой величины $T_{m,\tau}$, определяют $\epsilon_{пр}$ и C_p , а затем рассчитывают среднеобъемную температуру. При неудовлетворительном совпадении результата расчета температуры с принятым ее значением операцию повторяют. Результат расчета температуры в первом приближении берут за исходную величину.

Величиной $T_{m,\tau}$ для нахождения значений $\epsilon_{пр}$ и C_p приходится задаваться, исходя из опыта и практики расчета.

ПОРЯДОК РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

1. Выпишите из приложения 2 значения Q^p_n , V^0_g и V_0 для заданной жидкости.
2. Рассчитайте среднее значение коэффициента избытка воздуха α_m .
3. Рассчитайте приведенный объем продуктов горения V_g .
4. Рассчитайте средний расход горючей жидкости B (B_1 , B_2 , B_3 , ...) соответственно за время развития пожара $\tau = 2$ мин (5, 10, 20 и 30 мин).
5. Задайтесь значением среднеобъемной температуры в помещении для $\tau = 2$ мин развития пожара.
6. Рассчитайте объемную теплоемкость среды C_p в помещении при пожаре.
7. Рассчитайте значение приведенной степени черноты системы $\varepsilon_{пр}$.
8. Рассчитайте значение теоретической температуры горения жидкости T_a .
9. Рассчитайте значение среднеобъемной температуры среды $T_{m,\tau}$ в помещении для $\tau = 2$ мин развития пожара.
10. Сравните полученное расчетом (п.9) значение среднеобъемной температуры с принятым ранее значением ее для нахождения величин C_p и $\varepsilon_{пр}$ (пп. 6 и 7).

При неудовлетворительном совпадении (расхождение более $\pm 3\%$) следует повторить расчет, но уже в качестве нового приближения $T_{m,\tau}$ используется значение полученное в (п.9).

Расчеты по пп.5-10 выполните для 5, 10, 20 и 30 мин развития пожара в помещении. По результатам расчетов постройте график изменения среднеобъемной температуры во времени $T_{m,\tau} = f(\tau)$.

Полученный график в дальнейшем используется для решения последующей задачи (задание №2), поэтому его следует выполнить на отдельном листе в удобном для работы масштабе.

ЗАДАНИЕ 2. РАСЧЕТ ЛОКАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ СРЕДЫ В ПОМЕЩЕНИИ ПРИ ПОЖАРЕ

Используя условия и результаты расчетов задания 2, рассчитайте возможные значения температур среды в помещении:

- под перекрытием над факелом для $\tau = 2, 5, 15$ и 30 мин развития пожара. По результатам расчетов этого пункта постройте график изменения температуры во времени $T_{(x=0, y=n)} = f(\tau)$;

- локальную в точках, находящихся на высоте $y = 1,5$ м от пола и расстояниях от границы горения $0,25 l, 0,5 l, 0,75 l$ и l , через $2, 5, 15$ и 30 мин его развития. По результатам расчетов этого пункта постройте графики $T_{(x, y=1,5)} = f(\tau)$.

Результаты расчета представить в виде таблицы 1 и графиков.

Таблица 1

Время, мин.	2	5	15	30
$T_{m,\tau}$, К				
$T_{(x=0, y=n)}$, К				
$T_{(x=0,25l, y=1,5)}$, К				
$T_{(x=0,5l, y=1,5)}$, К				
$T_{(x=0,75l, y=1,5)}$, К				
$T_{(x=l, y=1,5)}$, К				

ПОЯСНЕНИЯ К РЕШЕНИЮ ЗАДАНИЯ

Локальное значение температуры среды в помещении при пожаре для любого момента времени τ :

$$T_{x,y,\tau} = T_{m,\tau} \left(0,8 + \frac{0,2y}{0,5H} \right) \cdot \left(1,33 - \frac{x}{2x + 0,5l} \right).$$

ПОРЯДОК РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

1. Рассчитайте значение температуры под перекрытием над факелом $T_{(x=0, y=n)}$ для $\tau = 2, 5, 15$ и 30 мин развития пожара.

2. Рассчитайте температуру среды в помещении на заданных расстояниях от границы горения на высоте 1,5 м от пола для $\tau = 2, 5, 15$ и 30 мин развития пожара.

3. Представить графически изменение температуры среды на высоте 1,5 м во времени и на различных расстояниях от границы горения $T_{(x, y=1,5)} = f(\tau)$

4. По результатам расчетов п.п.1 и 2 постройте зависимости на одном рис.:

- а) $T_m = f(\tau)$ – зависимость среднеобъемной температуры от времени;
- б) $T_{(x=0, y=n)} = f(\tau)$ - зависимость температуры под перекрытием;
- в) $T_{(x=l, y=1,5)} = f(\tau)$ - зависимость температуры на высоте 1,5 м в торце цеха.

ЗАДАНИЕ 3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОЛЩИНЫ ЗАЩИТНОГО СЛОЯ РАБОЧЕЙ АРМАТУРЫ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ КОЛОННЫ

В результате пожара в производственном помещении, одна из железобетонных колонн цилиндрической формы радиусом R оказалась в среде (продукты сгорания), температура которой мгновенно повышается до температуры t_f и остается постоянной. Начальная температура колонны t_0 .

Определить толщину защитного слоя (бетон) рабочей арматуры δ , при которой через τ часа прогрева температура на поверхности рабочей арматуры не превышала бы толщину защитного слоя рабочей арматуры в железобетонных колоннах $t_{кр}$.

Результаты расчета занести в таблицу 4.

Исходные данные для расчета

Таблица 1

Первая цифра номера варианта	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
τ , час	1,3	1,4	1,0	1,5	1,8	1,0	1,45	1,6	1,1	1,3
R , мм	140	150	130	160	180	120	135	165	120	150

Таблица 2

Вторая цифра номера варианта	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$t_{кр}$, °C	450	470	500	480	470	450	460	490	480	470
t_f , °C	800	750	700	740	850	750	820	740	800	760
t_0 , °C	20	25	20	25	20	25	20	25	20	25

Таблица 3

Третья цифра номера варианта	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\rho, \text{кг/м}^3$	1800	1900	1700	1750	1800	1900	1680	1720	1780	1800
$C, \text{Дж/(кг}^\circ\text{C)}$	780	770	850	750	770	750	760	800	750	770
$\lambda_0, \text{Вт/(м}^\circ\text{C)}$	1,65	1,42	1,25	1,35	0,85	1,65	1,42	1,25	1,35	0,85
$b \cdot 10^3$	-0,8	-0,6	-0,7	-0,3	-0,6	-0,4	-0,3	-0,8	-0,6	-0,7

Примечание: $\lambda = \lambda_0 + b t$

Результаты расчета

Таблица 4

Параметры	Единица измерения	Значение величины
Коэффициент теплоотдачи от продуктов горения α		
Температура среды t_f		
Температура на поверхности ко- лонны t_R		
Температура в точке r_1 по радиу- су колонны t_{r1}		
Температура в точке r_2 по радиу- су колонны t_{r2}		
Температура на оси колонны t_0		
Толщина защитного слоя δ		

ПОЯСНЕНИЯ К РЕШЕНИЮ ЗАДАНИЯ

В практике пожарного дела одна из главных задач — обеспечение прочности и устойчивости несущих конструкций не только при нормальных условиях эксплуатации, но и в условиях возможного пожара.

Пожарная безопасность или огнестойкость сооружений достигается прежде всего соответствующим подбором конструкций и материалов, обладающих определенными свойствами.

Решить данную задачу помогает умение находить распределение температуры во времени для любой точки тела $t(x, \tau)$.

Процесс распространения тепла теплопроводностью может быть описан математически дифференциальным уравнением, выведенным на основе закона сохранения энергии, при условии, что тепло распространяется в теле (среде), физические свойства которого — плотность (ρ), теплоемкость (c) и теплопроводность (λ) — не изменяются по направлениям и во времени.

Для одномерных тел и при отсутствии внутренних источников теплоты, дифференциальное уравнение теплопроводности может быть представлено в общей форме:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{\Gamma}{r} \frac{\partial t}{\partial r} \right), \quad (1)$$

где r — текущая координата; Γ — постоянное число, равное

- для пластины $\Gamma = 0$ ($r = x$), следовательно (1) принимает вид:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t}{\partial x^2}; \quad (2)$$

- для цилиндра $\Gamma = 1$ ($r = r$), и тогда:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial t}{\partial r} \right). \quad (3)$$

В этом уравнении $a = \frac{\lambda}{c\rho}$, м²/с — коэффициент температуропроводности.

водности.

Коэффициент температуропроводности является физической величиной вещества и характеризует скорость изменения температуры.

Это уравнение дает возможность решать задачи, связанные с распространением тепла в теле теплопроводностью как при установившемся (стационарном), так и при неуставившемся (нестационарном) тепловом потоке. При решении конкретных задач дифференциальное уравнение дополняется *начальными* и *граничными условиями*, характеризующими каждую конкретную задачу.

Начальные условия определяют температурное поле (распределение температур) в начальный момент времени и заключаются, в том, что для начального момента времени должна быть известна функция:

$$t_0 = f(x, y, z, \tau),$$

а *граничные условия* определяют особенности протекания процесса на границах тела и могут быть заданы следующим образом.

Граничное условие первого рода состоит в задании распределения температуры на поверхности тела в виде функции:

$$t_w = f(x, y, z, \tau). \quad (4)$$

Граничные условия второго рода состоят в задании плотности теплового потока на поверхности тела:

$$q_w = f(x, y, z, \tau). \quad (5)$$

Граничные условия третьего рода состоят в задании температуры окружающей среды t_f и интенсивности теплообмена α .

Примечание. В условиях пожара греющей средой являются продукты горения и коэффициент теплоотдачи α приближенно вычисляют по уравнению:

$$\alpha = 11,63 e^{0,0023 t_f}, \quad (6)$$

где t_f — температура греющей среды

Дифференциальное уравнение теплопроводности (1) совместно с начальными и граничными условиями дает полное математическое описание конкретной задачи теплопроводности.

Решение этой задачи может быть выполнено как аналитически, так и численными методами.

Аналитическое решение (методы преобразований Фурье и Лапласа) подобных задач возможно только для:

- а) тел простой формы (плоская стенка, цилиндр, шар);
- б) при условии неизменности во времени граничных условий;

В практической деятельности, как правило, применяют численные методы, которые пригодны для тел сложной конфигурации, переменных граничных условиях и зависящих от температуры теплофизических свойств материала объекта исследования.

Проблема решения уравнения (1.1) является чисто математической, и аналитическое решение таких задач даже для тел простой формы очень затруднительно, из-за необходимости найти общую зависимость для всех режимов — неупорядоченного, регулярного и стационарного.

В связи с этим, исследователи пришли к выводу о возможности раздельного рассмотрения каждого из этих режимов и нахождения для каждого из них способа решения. В результате чего, расчетные формулы и сам расчет сильно упрощается.

В рамках данного учебного пособия мы ограничимся рассмотрением лишь задачи нестационарной теплопроводности неограниченного сплошного цилиндра.

Допустим, имеется неограниченный сплошной цилиндр радиусом R с начальной температурой t_0 . Известны физические свойства материала стенки: коэффициенты температуропроводности (a) и теплопроводности (λ). Цилиндр помещается в среду с температурой t_f ($t_f > t_0$). Коэффициент теплоотдачи α остается неизменным на весь период нагревания.

Таким образом, для нахождения распределения температуры по толщине стенки во времени τ , необходимо решать дифференциальное

уравнение нестационарной теплопроводности (2.1) с граничными условиями третьего рода:

$$-\lambda \cdot \frac{\partial t}{\partial n} = \alpha(t_f - t_R). \quad (7)$$

При решении технических задач в большинстве случаев достаточно знать температуру на поверхности t_R и в средней плоскости стенки $t_{r=0}$.

В этом случае решение данной задачи упрощается и принимает следующий вид:

- для поверхности цилиндра

$$\frac{t_f - t_R}{t_f - t_0} = f(\text{Bi}, \text{Fo}); \quad (8)$$

- на оси цилиндра

$$\frac{t_f - t_{r=0}}{t_f - t_0} = f(\text{Bi}, \text{Fo}); \quad (9)$$

Здесь критерии Био и Фурье определяются соответственно

$$\text{Bi} = \alpha \cdot \frac{\delta}{\lambda}, \quad (10)$$

$$\text{Fo} = a \cdot \frac{\tau}{\delta^2}. \quad (11)$$

Итак, определив из соответствующего графика функцию $f(\text{Bi}, \text{Fo})$ [на рис. 1 приложения 2 представлена зависимость $f(\text{Bi}, \text{Fo})$ для поверхности цилиндра, а на рис. 2 приложения 2 — зависимость $f(\text{Bi}, \text{Fo})$ на оси цилиндра], можно определить искомую температуру. В нашем случае t_R .

Приведенные соотношения (8) и (9) применимы как для нагрева, так и для охлаждения, не только в случае сплошного цилиндра, но и применительно к плоской стенке и телам сферической формы.

Кроме того, они могут быть использованы не только для двухстороннего, но и для одностороннего процесса. Это возможно, при условии, когда коэффициент теплоотдачи с одной стороны намного превышает коэффициент теплоотдачи с противоположенной стороны, т. е. считая ее теп-

лоизолированной.

ПОРЯДОК РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

По условию задачи необходимо найти толщину защитного слоя арматуры, которая определяется расстоянием от поверхности колонны до точки пересечения кривой распределения температур по радиусу r цилиндра с критической температурой арматуры.

При нахождении распределения температур необходимо определить температуры в двух точках — на поверхности t_R ($r = R$) и на оси $t_{r=0}$ ($r = 0$) цилиндра. Температуры в этих точках находятся с помощью графиков 1 и 2, соответственно (см. приложение 2).

На графиках по оси абсцисс отложены значения критерия Фурье:

$$Fo = \frac{a\tau}{R^2},$$

а кривые линии соответствуют значениям критерия Био:

$$Bi = \frac{\alpha R}{\lambda}.$$

На оси ординат графика 1 приложения 2 отложена относительная разность температур на поверхности цилиндра

$$\frac{t_f - t_R}{t_f - t_0} = \theta_R$$

а на оси ординат графика 2 приложения — относительная разность температур на оси цилиндра:

$$\frac{t_f - t_{r=0}}{t_f - t_0} = \theta_0$$

Следовательно, чтобы определить температуры t_R и $t_{r=0}$, необходимо с начала вычислить критерии Bi и Fo , а затем по соответствующим графикам 1 и 2 приложения 2 найти точки пересечения кривой Bi с перпендикуляром, восстановленным к оси Fo , и спроектировать эту точку на ось ор-

динат.

Таким образом, находим значения θ_R и θ_0 , которые в свою очередь позволяют определить значения температур t_R и $t_{r=0}$.

Однако вычисление корректны [значений критериев Bi и Fo затрудняется из-за зависимости физических свойств материала колонны от температуры, т. е. $a = f(t_m)$ и $\lambda = f(t_m)$].

Здесь

$$t_m = \frac{t_R + t_{r=0}}{2},$$

но, t_R и $t_{r=0}$ неизвестны до расчета.

В этом случае последовательность определения температур такова.

1. Выписать численные значения исходных термодинамических параметров своего варианта и перевести эти значения, если требуется, в единую Международную систему единиц (СИ).

2. Определить величину коэффициента теплоотдачи α от продуктов горения к колонне:

$$\alpha = 11,63 e^{0,0023 t_f}.$$

3. В первом приближении среднюю температуру t_m определить по формуле:

$$t_m = \frac{t_f + t_0}{2},$$

4. Вычислить коэффициенты теплопроводности λ и температуропроводности a .

5. Определить значения критериев Bi и Fo .

6. По графикам 1 и 2 приложения 2 найти соответствующие значения безразмерных относительных температур θ_R и θ_0 .

7. Из найденных величин θ_R и θ_0 найти значения температур t_R и $t_{r=0}$.

8. Вычислить новое значение средней температуры t_m :

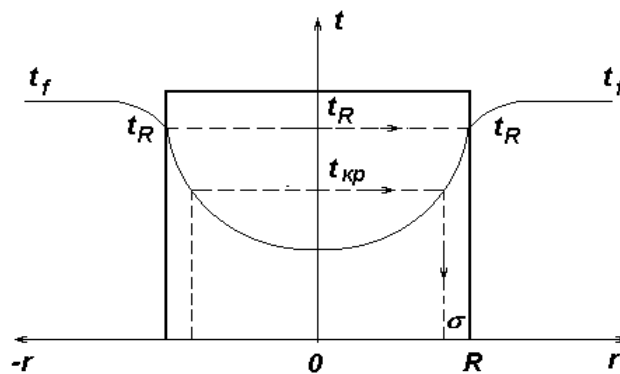
$$t_m = \frac{t_R + t_{x_{r=0}}}{2}.$$

Если полученное значение t_m отличается от ранее принятого более чем на 5%, то расчет повторяется с п. 4, принимая при этом за среднюю температуру вновь полученное значение в п. 8.

9. При достижении заданной точности, по полученным значениям температур на поверхности t_R и оси $t_{r=0}$ цилиндра, а также температуры продуктов горения t_f построить в масштабе кривую распределения температур по радиусу цилиндра. Для более точного построения температурной кривой вычислить температуру в двух промежуточных точках по радиусу r цилиндра при $r = r_1 = R/3$ и $r = r_2 = 2 \times R/3$ по формуле согласно [1]:

$$\frac{t_r - t_{r=0}}{t_R - t_{r=0}} = \left(\frac{r}{R} \right)^{Bi \frac{t_f - t_R}{t_R - t_{r=0}}}.$$

10. С помощью полученного графика, определить толщину защитного слоя арматуры, которая соответствует расстоянию между поверхностью колонны и точкой пересечения температурной кривой с критической температурой $t_{кр}$.



11. Полученные результаты занести в таблицу 1.4.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Теплота сгорания — это количество выделившейся теплоты при полном сгорании массовой (для твердых и жидких веществ) или объёмной (для газообразных) единицы вещества. Измеряется в джоулях или калориях. Теплота сгорания, отнесённая к единице массы или объёма топлива, называется удельной теплотой сгорания.

Для её измерения пользуются методами калориметрии. Теплота сгорания определяется химическим составом горючего вещества. Содержащиеся в горючем веществе химические элементы обозначаются принятыми символами C , H , O , N , S , а зола и вода — символами A и W соответственно.

Теплота сгорания может быть отнесена к рабочей массе горючего вещества Q^P , то есть к горючему веществу в том виде, в каком оно поступает к потребителю:

а) к сухой массе вещества Q^C ;

б) к горючей массе вещества $Q^Г$, то есть к горючему веществу, не содержащему влаги и золы.

Различают высшую (Q_B) и низшую (Q_H) теплоту сгорания.

Под высшей теплотой сгорания понимают то количество теплоты, которое выделяется при полном сгорании вещества, включая теплоту конденсации водяных паров при охлаждении продуктов сгорания.

Низшая теплота сгорания соответствует тому количеству теплоты, которое выделяется при полном сгорании, без учёта теплоты конденсации водяного пара. Теплоту конденсации водяных паров также называют скрытой теплотой сгорания.

Низшая и высшая теплота сгорания связаны соотношением:

$$Q_B = Q_H + k(W + 9H),$$

где k — коэффициент, равный 25 кДж/кг (6 ккал/кг); W — количество воды в горючем веществе, % (по массе); H — количество водорода в горючем

веществе, % (по массе).

Таким образом, высшая теплота сгорания — это количество теплоты, выделившейся при полном сгорании единицы массы или объема (для газа) горючего вещества и охлаждении продуктов сгорания до температуры точки росы. В теплотехнических расчетах высшая теплота сгорания принимается как 100 %. Скрытая теплота сгорания газа — это теплота, которая выделяется при конденсации водяных паров, содержащихся в продуктах сгорания. Теоретически она может достигать 11 %.

На практике не удастся охладить продукты сгорания до полной конденсации и потому введено понятие низшей теплоты сгорания (Q_H^P), которую получают, вычитая из высшей теплоты сгорания теплоту парообразования водяных паров как содержащихся в веществе, так и образовавшихся при его сжигании. На парообразование 1 кг водяных паров расходуется 2514 кДж/кг.

Низшая теплота сгорания определяется по формулам (кДж/кг):

а) для твердого вещества

$$Q_H^P = Q_B^P - 2514 \cdot \frac{9H^P + W^P}{100};$$

б) для жидкого вещества

$$Q_H^P = Q_B^P - 600 \cdot \frac{9H^P + W^P}{100},$$

где 2514 — теплота парообразования при температуре 0 °С и атмосферном давлении, кДж/кг; H^P и W^P — содержание водорода и водяных паров в рабочем топливе, %; 9 — коэффициент, показывающий, что при сгорании 1 кг водорода в соединении с кислородом образуется 9 кг воды.

Теплота сгорания является наиболее важной характеристикой топлива, так как определяет количество тепла, получаемого при сжигании 1 кг твердого или жидкого топлива или 1 м³ газообразного топлива в кДж/кг.

Низшая теплота сгорания определяется экспериментально для каждого вещества и является справочной величиной. Также её можно опреде-

лить для твердых и жидких материалов, при известном элементарном составе, расчётным способом в соответствии с формулой Д. И. Менделеева, кДж/кг:

$$Q_H^P = 339 C^P + 1256 H^P - 109 \cdot (O^P - S_L^P) - 25,14 \cdot (9H^P + W^P)$$

Или

$$Q_H^P = 81 C^P + 246 H^P - 26 \cdot (O^P + S_L^P) - 6W^P,$$

где C^P , H^P , O^P , S_L^P , W^P — содержание в рабочей массе топлива углерода, водорода, кислорода, летучей серы и влаги в процентах (по массе).

В России тепловые расчёты обычно ведут по низшей теплоте сгорания, в США, Великобритании, Франции — по высшей.

Наименование жидкости	$M_o \cdot 10^2$, кг/(м ² с)	$Q_{H_n}^P$, кДж/кг	V_0 , м ³ /кг	$V_{0_g}^0$, м ³ /кг
Амиловый спирт	1,75	39047	9,1	10
Мазут	3,47	38700	10,44	11,35
Бензин	5	41870	11,6	12,6
Бензол	7,17	40700	10,2	10,68
Бутиловый спирт	1,36	36145	8,64	9,52
Диэтиловый эфир	6	33500	8,64	9,55
Ксиол	2,89	43093	10,57	11,8
Метиловый спирт	1,61	22670	4,99	6,06
Толуол	4,72	42355	10,46	11,94
Дизельное топливо	4,16	48870	11,2	12,0
Ацетон	4,33	28800	7,26	8,14

M_o – массовая скорость выгорания (следует читать $M_o \cdot 10^2$ кг/(м²с) =

1,75, т.е. $M_0 = 1,75 \cdot 10^{-2}$ кг/(м²с);

Q_p – низшая рабочая теплота сгорания;

V_0 – теоретический объем воздуха, необходимый для горения;

V^0_{Γ} – теоретический объем продуктов горения (коэффициент избытка воздуха $\alpha_m = 1$).

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

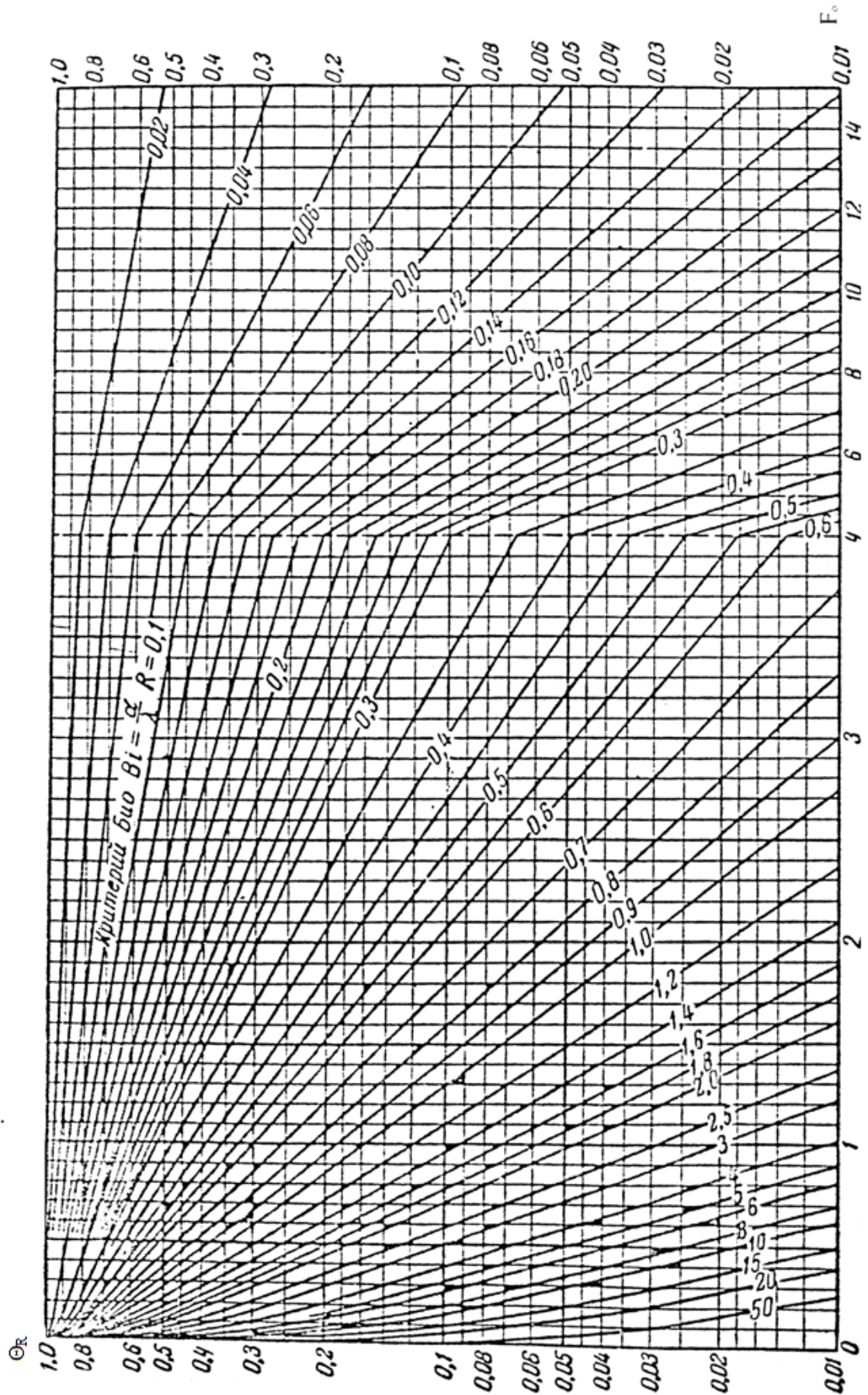


Рис.1 График зависимости относительной температуры Θ_R на поверхности цилиндра в зависимости от критериев Bi_o и Fo .

стр

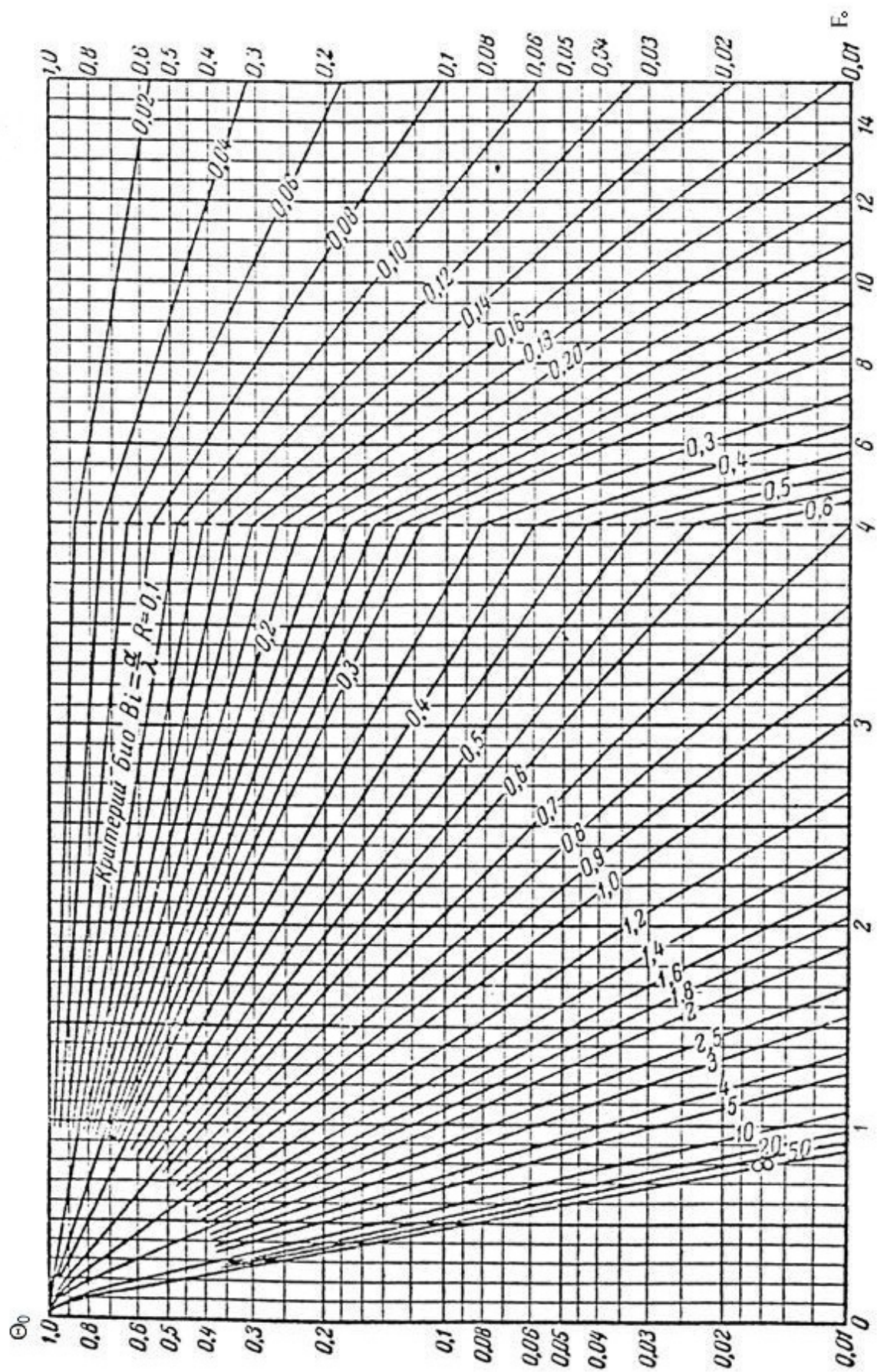


Рис.2 График зависимости относительной температуры Θ_0 на оси цилиндра в зависимости от критериев Био и Fo .

ЛИТЕРАТУРА

1. Теплотехника: Учеб. для вузов/ В.Н.Луканин, М.Г.Шатров, Г.М.Камфер и др.; Под ред. В.Н.Луканина. М.:Высш. шк., 2009.
2. Нащокин В.В. Техническая термодинамика и теплопередача. Учеб.пособие для вузов.-М.: Высшая школа, 1980.