

За указанными зонами вниз по потоку концентрации метана оказываются наименьшими для первого стабилизатора, несколько большими – для второго и наименьшими – для третьего. Отмеченная закономерность соответствует описанному выше распределению расходов воздуха в каналах эшелонированной решетки стабилизаторов. Зоны с избытком газа, как видно из рис. 2, охватывают газовые струи, омываемые сносимым потоком воздуха. Причем размеры данных зон сравнительно невелики и уменьшаются в направлении от оси струи к межструйному пространству.

Что же касается зон с повышенным содержанием воздуха, то они располагаются вблизи осей межстабилизаторных каналов, а также возле стенок горелочного устройства. Указанные зоны при удалении вниз по потоку сужаются и на некотором расстоянии от стабилизаторной решетки исчезают. При этом протяженность зон, прилежащих к стенкам горелочного устройства, оказывается несколько выше (см. рис. 2).

Как свидетельствуют результаты выполненных исследований, длины зон с повышенным содержанием воздуха вблизи осей межстабилизаторных каналов соотносятся между собой следующим образом. Данная длина, отвечающая межстабилизаторному каналу В, превышает таковую для канала С примерно на 0,1 м или на 20 % (здесь указанная длина отсчитывается от торца нижнего стабилизатора соответствующего межстабилизаторного канала). Как очевидно, это связано с заметно большим расходом воздуха в канале В по сравнению с его величиной для канала С (см. табл.).

Относительно пристеночных зон с повышенным содержанием воздуха, то для канала D данная зона существенно короче, чем для канала А, что обусловлено меньшим расходом воздуха в канале D.

#### Выводы:

1. На основе математического моделирования получены данные об основных особенностях процессов смесеобразования топлива и окислителя в микрофакельных горелочных устройствах с эшелонированным расположением стабилизаторов пламени.
2. Выполнен анализ полей концентрации метана в рассматриваемом горелочном устройстве и установлено их соответствие картине течения топлива, окислителя и горючей смеси.
3. Проведено сопоставление закономерностей смесеобразования в зонах, прилежащих к отдельным стабилизаторам, и показано, что данные закономерности в большей мере определяются особенностями перераспределения расходов воздуха в каналах эшелонированной решетки стабилизаторов пламени.

#### Литература

1. Фіалко Н.М. Моделирование структуры течения изотермического потока в эшелонированной решетке плоских стабилизаторов пламени / Н.М. Фіалко, В.Г. Прокопов, Л.С. Бутовский и др. // Промышленная теплотехника. – 2010. – № 6. – С. 28-36.
2. Фіалко Н.М. Особенности течения топлива и окислителя при эшелонированном расположении стабилизаторов пламени / Н.М. Фіалко, В.Г. Прокопов, Л.С. Бутовский и др. // Промышленная теплотехника. – 2011. – № 2. – С. 59-64.
3. Баламаджи И.И. Компьютерное моделирование течения топлива и окислителя в горелочных устройствах с эшелонированным расположением стабилизаторов пламени / И.И. Баламаджи, Н.М.

Фіалко, Н.О. Меранова // Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики : тези доповідей 9-ої Міжнар. наук.-практ. конф. аспірантів, магістрантів і студентів, Київ, 18-22 квітня 2011. – С. 127.

4. Жердочкин А.В. Особенности обтекания эшелонированной решетки плоских стабилизаторов пламени / А.В. Жердочкин, Н.М. Фіалко, Н.П. Полозенко // Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики : тези доповідей 9-ої Міжнар. наук.-практ. конф. аспірантів, магістрантів і студентів, Київ, 18-22 квітня, 2011. – С. 143.

5. Фіалко Н.М. Особенности смесеобразования при эшелонированном расположении стабилизаторов пламени в микрофакельных горелочных устройствах / Н.М. Фіалко, Ю.В. Шеренковский, В.Г. Прокопов и др. // Проблемы экологии и эксплуатации объектов энергетики : матер. XXI межд. конф., 7-11 июня 2011 г., Ялта-Київ, 2011. – С. 167-170.

6. Раушенбах Б.В. Физические основы рабочего процесса в камерах сгорания воздушно-реактивных двигателей / Б.В. Раушенбах, С.А. Белый, И.В. Беспалов и др. // М. : Изд-во Машиностроение, 1964. – 526 с.

#### **Фіалко Н.М., Прокопов В.Г., Шеренковский Ю.В., Альошко С.О., Полозенко Н.П., Бутовський Л.С., Абдулін М.З., Кліщ А.В., Новицький В.С., Евтущенко А.О. Закономірності сумішоутворення в ешелонованих решітках плоских стабілізаторів полум'я**

Наведено результати математичного моделювання процесів сумішоутворення палива та окисника в мікрофакельних пальникових пристроях з ешелонованим розташуванням стабілізаторів полум'я. Для сходинок-ешелонованої решітки, що складається з трьох стабілізаторів, розглянуто особливості полів концентрацій метану в досліджуваному пальниковому пристрої, проаналізовано їх обумовленість структурою течії горючої суміші і висвітлено специфіку цієї структури. Особливу увагу приділено порівняльному аналізу картини сумішоутворення в зонах, які відповідають стабілізаторам, різним чином зміщеним вниз за потоком.

**Ключові слова:** сумішоутворення; ешелонована решітка стабілізаторів полум'я; мікрофакельний пальниковий пристрій; математичне моделювання; поля концентрацій; структури течії; зони зворотних токів.

#### **Fialko N.M., Prokopov V.G., Sherenkovsky Y.V., Alyoshko S.O., Polozenko N.P., Butovsky L.S., Abdulin M.Z., Klishch A.V., Novitsky V.S., Evtushenko A.A. Carburatıon Behavior in Echelon Grates of Flat Flame Stabilizers**

The results of mathematical modeling of the mixing of fuel and oxidizer in microjet burner devices with echeloned location of flame stabilizers are presented. The features of methane concentration fields in the test burner device are considered for the stair echelon grate, which consist of three stabilizers, dependence of these fields from flow structure of the combustible mixture are analyzed and specific of this structure is discoursed. Particular attention is paid to the comparative analysis in the areas of pattern mixing, which are corresponding to variously shifted downstream stabilizers.

**Key words:** carburatıon; echelon grate of flame stabilizers; microjet burner device; mathematical modeling; concentration fields; flow structure; zone of reverse currents.

УДК 536.2

*Вед. науч. сотр. В.Г. Прокопов, д-р техн. наук –  
Институт технической теплофизики НАН Украины, г. Киев*

#### **АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ИЗМЕНЕНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ РАЗМЕРОВ МНОГОСЛОЙНОЙ ПЛАСТИНЫ ПРИ МАТЕМАТИЧЕСКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОПЕРЕНОСА**

На основе математического моделирования исследованы процессы теплопроводности в многослойных пластинах при наличии импульсных источников теплоты. Выявлены закономерности явления локализации геометрических характеристик пластины в рассматриваемой физической ситуации. Показано, что учет данного явления позволяет существенно упростить нахождение решения собственно в зоне теплоподвода, а имен-

но, определение максимальной температуры процесса и колебаний температуры в этой зоне. Применительно к условиям, когда температурная зависимость теплоемкости материала пластины является линейной, получено аналитическое выражение для нахождения изменения температуры во времени в области теплоподвода.

**Ключевые слова:** компьютерное моделирование, многослойные пластины, явления локализации, замещение условий однозначности, процессы теплопроводности.

**Введение.** В целом ряде ситуаций при формулировке тех или иных математических моделей физических процессов вводятся некоторые допущения, позволяющие изменить условия однозначности и, как следствие, облегчить решение поставленной задачи. В качестве примеров таких изменений могут служить подходы, реализующиеся на основе принципа Сен-Венана, принципа стабильности теплового потока А.И. Вейника, принципа местного влияния источников энергии Н.Н. Рыкалина и т. д. [1]. Согласно данным подходам исходные условия однозначности заменяются на приближенно отвечающие им в том или ином смысле. Очевидно, при таких заменах обеспечивается лишь приближенное соответствие решений, определяемых исходной и преобразованной математическими моделями. Ввиду изложенного отмеченные выше замещения условий однозначности могут быть классифицированы как приближенные.

Наряду с этим, в целях упрощения нахождения решений во многих случаях проводятся те или иные формально строгие математические преобразования исходной математической постановки задачи, также приводящие к изменению условий однозначности. Такие преобразования реализуются, например, при заменах условий однозначности, определяемых теорией подобия, конформными и другими отображениями, принципом эквивалентности Г.Е. Пухова, принципом эквивалентности в теории теплопроводности А.И. Пеховича и т. д. В случае указанных замен условий однозначности исходная и преобразованная математические модели идентичны в плане возможности получения на их основе одинаковых окончательных результатов. То есть замещение условий однозначности в таких ситуациях не приводит к какому-либо изменению искомого функций во всех точках рассматриваемой области. Ввиду этого данные преобразования условий однозначности могут быть названы точными. Заметим, что в случае последних преобразований основные операторные уравнения могут оставаться неизменными или меняться. Первая из указанных возможностей реализуется, например, при использовании теории подобия, конформных отображений, принципа эквивалентности А.И. Пеховича и т. д. В качестве примера второй возможности, заслуживающего особого внимания, отметим подходы, базирующиеся на принципе эквивалентности Г.Е. Пухова. Подчеркнем также, что при точных преобразованиях условий однозначности возможно как замещение только одного из них, так и взаимозависимое изменение нескольких условий однозначности.

Ниже рассматриваются лишь приближенные замещения условий однозначности и притом только тех из них, которые являются локализованными. Такие замещения условия однозначности имеют важное практическое значение, поскольку существенные погрешности окончательного решения, ими обусловленные, наблюдаются лишь в ограниченной подобласти – в зоне локализации влияния определенной специфики замещенного условия однозначности; за пре-

делами же этой зоны, т.е. в соответствующей зоне автономности, может быть получено практически точное решение рассматриваемой задачи. В данной работе на примере решения задачи нестационарного кондуктивного теплопереноса в многослойной пластине при импульсном периодическом теплоподводе рассмотрены возможности изменения геометрических размеров исследуемой области, т.е. изменения толщины многослойной пластины, базирующиеся на явлениях локализации. Математическая постановка этой задачи приведена в [2].

В ряде работ (см., например, [1-2]) проанализированы замещения различных условий однозначности – внутренних источников теплоты, теплового потока, подводимого к обогреваемой поверхности, физических свойств пластины, благодаря которым упрощалось исследование процесса в пространственно-временных подобластях, удаленных от высокотемпературной зоны. Однако, как известно, во многих ситуациях одной из основных задач теплового расчета является определение максимальной относительной температуры процесса  $\theta_{max}$  и колебаний температуры в зоне теплоподвода  $\Delta\theta_w$  ( $\Delta\theta_w = \theta_B - \theta_M$ , где  $\theta_B, \theta_M$  наибольшая и наименьшая температуры в данной точке пластины). Ввиду этого представляет интерес анализ таких изменений геометрических характеристик пластины, которые позволяют существенно упростить определение указанных величин. Для уяснения возможности отмеченных изменений рассмотрим вначале ситуацию, когда действует лишь одиночный импульс теплоподвода или (что аналогично) серия импульсов в условиях, когда продолжительность периода  $Fo_1$  достаточно велика по сравнению с временем импульса  $Fo_u$ , так что по истечении  $Fo_1$  восстанавливается начальное тепловое состояние пластины.

Изменения геометрических размеров области в данном случае основываются на явлениях количественной пространственно-временной локализации влияния теплоподвода. Проявление отмеченного вида локализации состоит здесь в том, что в начальный период процесса зона, в пределах которой наблюдается практически осязаемое распространение теплового потока, обусловленного наличием внутренних источников энергии или подводом теплоты к обогреваемой поверхности, оказывается ограниченной. Причем размеры этой зоны (зоны локализации) являются функцией времени. (Очевидно, с течением времени зона локализации увеличивается вплоть до охвата всей области, что соответствует проявлению количественной пространственно-временной локализации влияния теплоподвода). Такая картина процесса позволяет воспользоваться известными понятиями пассивной границы [3] или глубины проникновения теплового потока [4] и упростить решение задачи, благодаря изменению области. Причем размеры области могут быть либо увеличены вплоть до бесконечности (что в ряде случаев позволяет достаточно просто найти аналитическое решение задачи), либо существенно уменьшены. В последнем случае исключается из рассмотрения (отсекается) подобласть, расположенная за пределами зоны локализации. В анализируемой ситуации при теплоподводе только за счет внутренних источников энергии в течение всего времени подвода энергии ( $0 < Fo^* \leq Fo_u^*$ ) ввиду кратковременности каждого импульса оказывается возможным предельно уменьшить размеры исследуемой области, ограничиваясь рассмотрением лишь зоны теплоподвода. Это обусловлено тем, что в отмеченном интервале времени

( $0 < Fo^* \leq Fo_u^*$ ) тепловой поток практически не распространяется за пределы зоны теплоподвода, и перетоками теплоты можно пренебречь в связи с их малостью. Ввиду изложенного исходная математическая модель может быть существенно упрощена: соотношения для определения искомой температуры в данной ситуации представим в виде

$$\int_{\theta_0(Pd^*)}^{\theta} C_V(\theta) d\theta = \int_0^{Fo^*} Po(Pd^*, Fo^*) dFo^*. \quad (1)$$

В том случае, если температурная зависимость теплоемкости оказывается линейной (или правомерна ее линейная аппроксимация вида  $C_V = p + s\theta$ ), окончательное выражение для нахождения температуры в зоне теплоподвода в течение времени действия импульса имеет вид

$$\theta = \frac{-p + \sqrt{p^2 - 2sW}}{s}, \quad (2)$$

где 
$$W = - \left[ \int_0^{Fo^*} Po(Pd^*, Fo^*) dFo^* + p\theta_0(Pd^*) + 0,5s\theta_0^2(Pd^*) \right].$$

В условиях достаточно кратковременного теплоподвода соотношения (1), (2) могут быть использованы также для более общего случая, когда имеет место не одиночный импульс, а их серия с тепловым влиянием каждого предыдущего импульса на тепловое состояние последующего. В этом случае при нахождении температуры в период теплоподвода для  $k$ -того импульса вместо начального условия  $\theta_0(Pd^*)$  должно фигурировать распределение температуры в пластине перед началом  $k$ -того импульса  $\theta_k(Pd^*) = \theta(Pd^*, k-1)$ . Такая возможность использования зависимостей (1), (2) базируется на том обстоятельстве, что в пределах каждого отдельного импульса серии наблюдается описанная выше количественная пространственно-временная локализация влияния теплоподвода, реализующегося в рамках этого импульса. Различие состоит лишь в том, что если при одиночном импульсе локализация происходит на фоне начального распределения температуры, то в случае серии импульсов – на фоне распределения температуры, которое имеет место в конце предшествующего периода. Ввиду этого при определении температурного режима пластины в зоне теплоподвода, в частности максимальной температуры процесса  $\theta^{\max}$ , колебаний температуры  $\Delta\theta_w$  и пр., обычно необходимо знание величины  $\theta_k(Pd^*)$  для каждого рассматриваемого импульса. Следует, однако, иметь в виду, что если теплофизические свойства материала не зависят от температуры (т.е. математическая модель процесса является линейной), то величина  $\Delta\theta_w$  оказывается неизменной, но зависящей от номера импульса и, следовательно, достаточно ограничиться ее определением для первого из серии импульсов.

На рис. представлены характерные результаты сопоставления температуры  $\theta^*$  ( $\theta^* = \theta - \theta_k$ ), полученной в результате численного решения задачи и рассчитанной по зависимости (2). Как видно, имеет место практически полное совпадение сравниваемых данных; расхождение во всем исследуемом диапазоне не превышает 0,4 %.

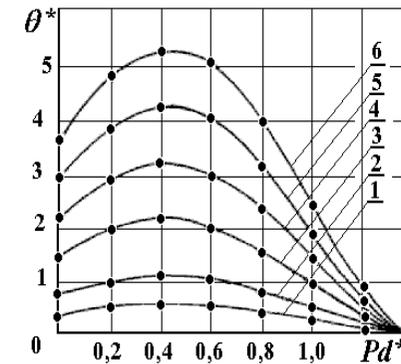


Рис. Изменения температуры  $\theta^*$  вдоль координаты  $Pd^*$  в зоне теплоподвода в различные моменты времени: 1)  $Pd^* = 5 \cdot 10^{-6}$ ; 2)  $Pd^* = 1 \cdot 10^{-5}$ ; 3)  $Pd^* = 2 \cdot 10^{-5}$ ; 4)  $Pd^* = 3 \cdot 10^{-5}$ ; 5)  $Pd^* = 4 \cdot 10^{-5}$ ; 6-  $Pd^* = 5 \cdot 10^{-5}$ ; — расчет по формуле (2); ● численное решение задачи

**Выводы.** Проанализирована возможность изменения размеров области, основанная на эффекте количественной пространственно-временной локализации влияния теплоподвода. Показано, что учет этой возможности позволяет существенно упростить исследование теплового состояния высокотемпературной зоны многослойной пластины, и, в частности, нахождение максимальной температуры процесса  $\theta^{\max}$  и наибольших температурных колебаний  $\Delta\theta_w$ . Отмечается, что поскольку явление локализации характерно не только для процессов теплопроводности, но и для других явлений переноса, то высказанные общие соображения относительно различных аспектов замещения условий однозначности распространяемы и на иные устойчивые многомерные процессы разной физической природы.

### Литература

1. Прокопов В.Г. Основы теории локализации / В.Г. Прокопов, Н.М. Филалко, Ю.В. Шеренковский. – К. : Изд-во ИТТФ НАН Украины, 2003. – 200 с.
2. Прокопов В.Г. Эффекты локализации влияния физических свойств слоисто-неоднородной системы в условиях импульсного периодического нагрева / В.Г. Прокопов // Науковий вісник НЛТУ України : зб. наук.-техн. праць. – Львів : РВВ НЛТУ України. – 2014. – Вип. 24.8. – С. 123-129.
3. Пехович А.И. Расчеты теплового режима твердых тел / А.И. Пехович, В.М. Жидких. – Л. : Изд-во "Энергия", 1976. – 350 с.
4. Гудмен Т. Применение интегральных методов в нелинейных задачах нестационарного теплообмена / Т. Гудмен // Проблемы теплообмена : сб. науч. тр. – М. : Изд-во Атомиздат, 1967. – С. 41-95.

### Прокопов В.Г. Аналіз можливостей зміни геометричних розмірів багатопшарової пластины при математичному моделюванні процесів теплопереносу

На основі математичного моделювання досліджено процеси теплопровідності в багатопшарових пластинах за наявності імпульсних джерел теплоти. Виявлено закономірності явища локалізації геометричних характеристик пластины в розглянутій фізичній ситуації. Показано, що врахування цього явища дає змогу істотно спростити знаходження рішення власне в зоні теплопідводу, а саме, визначення максимальної темпера-

тури процесу і коливань температури в цій зоні. Стосовно до умов, коли температурна залежність теплоємності матеріалу пластини є лінійною, отримано аналітичний вираз для знаходження зміни температури в часі в області теплопідводу.

**Ключові слова:** комп'ютерне моделювання, багатошарові пластини, явище локалізації, заміщення умов однозначності, процеси теплопровідності.

**Prokopov V.G. Analysis of Opportunities of Dimensional Changes of Laminated Plates in the Mathematical Modeling of Heat Transfer Processes**

The processes of heat conduction in multilayer plates in the presence of pulsed sources of heat were studied on the base of mathematical modeling. The regularities of localization geometric characteristics of the plate in the given physical situation were exposed. Shown that the keeping of this phenomenon can greatly simplify finding the proper solutions in the area of the heat, namely the determination of the maximum process temperature and temperature fluctuations in this zone. An analytical expression for finding the temperature changes over time in the area of the heat was received relation to the conditions when the temperature dependence of the specific heat of the plate material is linear.

**Key words:** computer modeling, multi-plate, localization phenomenon, substitution uniqueness conditions, heat conductivity processes.

УДК 536.531:006.354

Доц. В.О. Фединець, д-р техн. наук;  
здобув. О.М. Кулик – НУ "Львівська політехніка"

**ДОСЛІДЖЕННЯ УМОВ ТЕПЛООБМІНУ ПЕРВИННОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ТЕМПЕРАТУРИ, СУМІЩЕНОГО З ТРУБКОЮ ПОВНОГО ТИСКУ В ТЕПЛОВОМУ ЛІЧИЛЬНИКУ**

Досліджено умов теплообміну первинного перетворювача температури, суміщеного з трубкою повного тиску в тепловому лічильнику. Запропоновано варіанти можливого конструктивного виконання вузла вимірювання температури. Наведено структуру пограничного шару і розподіл коефіцієнта теплопередачі при обтіканні перетворювача температури потоком теплоносія. Показано, що пограничний шар містить ламінарний пограничний підшар, перехідну зону і турбулентний пограничний підшар. Подано рекомендації з вибору місця встановлення вузла вимірювання температури на тілі трубки повного тиску для зменшення похибки вимірювання температури.

**Ключові слова:** первинний перетворювач температури, трубка повного тиску, коефіцієнт теплопередачі, ламінарний і перехідний підшар.

**Вступ.** Системи обліку тепла стають необхідними як споживачам тепла, так і його постачальникам. Важливим критерієм якості систем теплопостачання є відсутність температурного дискомфорту в приміщенні та постійна наявність гарячої води з певною температурою в необхідному об'ємі. Визначення кількості тепла здійснюється лічильником, що включає в себе блок вимірювання витрати, блок вимірювання температури й обчислювач кількості тепла.

**Аналіз публікацій.** В останні роки виникла тенденція до створення комбінованих конструкцій для одночасного вимірювання декількох параметрів теплоносія. Так, у роботі [1] автори запропонували лічильник кількості тепла на базі гідродинамічного вимірювача витрати з використанням методу Піто. У такому витратомірі трубка статичного тиску виконана у вигляді кільцевої камери по внутрішній стінці трубопроводу подачі теплоносія, а трубка повного тиску суміщена із первинним перетворювачем температури теплоносія та розміщена в центрі трубопроводу і напрямлена назустріч потоку по його осі.

Дослідження функції перетворення лічильника тепла можна провести тільки після дослідження функції перетворення вимірювача витрати і первинного перетворювача температури. Дослідження функції перетворення витратоміра проведені в [2].

**Мета роботи.** Дослідити умови теплообміну первинного перетворювача температури (ППТ), суміщеного з трубкою Піто, і на основі цих досліджень вибрати оптимальне місце його встановлення.

**Виклад основного матеріалу.** Суміщене виконання первинних перетворювачів швидкості потоку та його температури дає змогу забезпечити підвищення точності вимірювання температури теплоносія і цим самим – точність визначення кількості тепла, що передається споживачеві, та підвищити достовірність процесу вимірювання [3]. Варіанти можливого конструктивного виконання вузла вимірювання температури наведено на рис. 1.

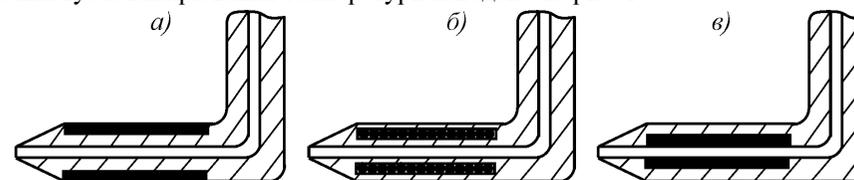


Рис. 1. Варіанти можливого конструктивного виконання вузла вимірювання температури: а) поверхневий ППТ, розташований на зовнішній поверхні трубки повного тиску; б) ППТ, виконаний у вигляді біфілярної обмотки та розташований в тілі трубки повного тиску; в) ППТ, розташований всередині каналу трубки повного тиску

Розглянуто умови теплообміну досліджуваного потоку теплоносія з ППТ. Пропонується схематичне зображення процесу теплопередачі від теплоносія до ППТ, яке зображено на рис. 2.

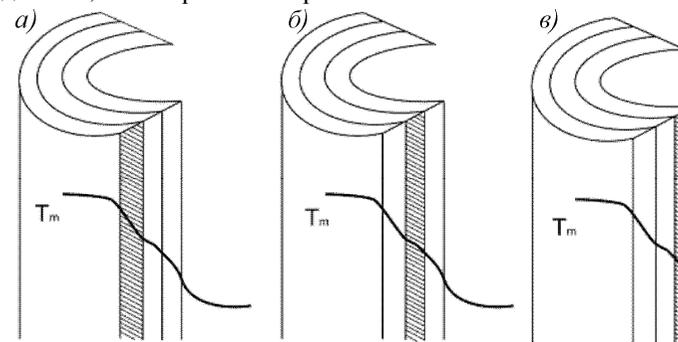


Рис. 2. Схематичне зображення процесу передачі тепла від теплоносія до чутливого елемента ППТ ( $T_m$  – температура теплоносія)

На рис. 2 а ППТ розмішений на зовнішній поверхні трубки повного тиску, на рис. 2 б – втоплений в тіло трубки повного тиску і на рис. 2 в – розташований на внутрішній поверхні трубки. У першому наближенні конструкцію ППТ пропонується замінити циліндричною багатошаровою стінкою (рис. 2).

Передача тепла від теплоносія до поверхні ППТ описується рівнянням, яке враховує теплопередачу за рахунок конвективного теплообміну та теплопе-