

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНЫХ ФОРМ СВОБОДНО-КОНВЕКТИВНЫХ ТЕЧЕНИЙ В ЗАМКНУТОМ КОНТУРЕ

Ю.М. Ашурко

ГНЦ РФ-Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского, г. Обнинск



Работа посвящена анализу возможных форм и механизмов возникновения свободно-конвективных течений однофазной несжимаемой жидкости в замкнутом контуре. Показано, что наряду с общекартурной естественной циркуляцией теплоносителя могут существовать локальные замкнутые контуры естественной циркуляции на отдельных участках контура. Описаны условия возникновения локальной естественной циркуляции теплоносителя на горизонтальных и вертикальных участках замкнутого контура и принципы суперпозиции общекартурной и локальной естественной циркуляции.

ВВЕДЕНИЕ

В самом общем случае возникновение свободно-конвективных течений в жидкостях и газах обусловлено неоднородным действием на них какого-либо вида объемных сил или их совокупности. Чаще всего в качестве объемной силы рассматривается сила земного притяжения, действующая на все жидкости и газы в земных условиях. В силу этого можно говорить о фундаментальном характере вызываемых ею свободно-конвективных течений. В связи с фундаментальностью данного явления оно зачастую используется для организации движения сред в различных установках, например, для организации естественной циркуляции теплоносителя в замкнутых контурах жидкометаллических быстрых реакторов (БР) с целью отвода остаточного тепловыделения реактора [1].

В этом случае устойчивость естественной циркуляции (ЕЦ) теплоносителя и ее параметры будут непосредственным образом влиять на безопасность БР. В свою очередь, величина расхода ЕЦ и его устойчивость существенно зависят от характеристик контуров БР, исходных условий и характера протекания режима ЕЦ. Наличие большого числа обратных связей между различными параметрами требует тщательного обоснования режимов ЕЦ в контурах БР.

Однако, несмотря на большое количество публикаций, посвященных изучению явления естественной конвекции, следует отметить, что процессы, связанные с развитием естественной циркуляции теплоносителя в замкнутых контурах, исследованы еще недостаточно досконально. Так ЕЦ теплоносителя в замкнутых контурах моделируется, как правило, в виде одномерного течения [2]–[3]. Тем не менее, отдельные наблюдавшиеся на практике явления указывают на ограниченность одномерного представления теплоотводящих контуров и необходимость учета пространственной картины течения теплоносителя в них. Например, анализ режима ЕЦ теплоноси-

теля в 1 контуре быстрого реактора PFR выявил достаточно сложный пространственный характер течения натрия в баке реактора [4]. Более того, результаты теоретических исследований, приведенные в этой статье, показывают, что в большинстве случаев необходимо учитывать пространственный характер свободно-конвективного течения теплоносителя не только на участках контура, характеризующихся большими размерами как, например, верхняя смесительная камера бака реактора, но также в трубопроводах и других элементах контура.

ПРЕДМЕТ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИСПОЛЬЗУЕМОЕ ПРИБЛИЖЕНИЕ

Задачей исследования, представленного в данной статье, является анализ возможных форм естественной циркуляции однокомпонентной однофазной несжимаемой неизотермической жидкости (далее «теплоносителя») в замкнутом контуре и принципов наложения этих форм ЕЦ друг на друга.

Таким образом, источником ЕЦ является перепад давления, который возникает в замкнутом контуре в результате действия силы земного притяжения на теплоноситель с неравномерно распределенной по длине контура плотностью. Неравномерное распределение плотности теплоносителя по длине контура обусловлено соответствующим неравномерным распределением температуры теплоносителя по длине контура, т.е. его неизотермичностью.

Говоря о естественной циркуляции, имеют в виду свободно-конвективное движение, направленное вдоль контура. Таким образом, для нас представляет интерес только та составляющая свободно-конвективного течения (СКТ) теплоносителя, которая направлена вдоль контура, обеспечивая тем самым циркуляцию теплоносителя и перенос тепла в контуре. Свободно-конвективным течением теплоносителя в плоскостях поперечных сечений контура пренебрегаем (за одним исключением, о котором будет сказано ниже), т.к. эта составляющая влияет только на распределение температуры теплоносителя по сечению контура и не влияет на распределение температуры теплоносителя по длине контура и на перенос тепла вдоль контура.

Для упрощения задачи будем рассматривать простой односвязный замкнутый контур (рис. 1), не имеющий разветвлений и байпасов. В контуре отсутствуют специальные побудители, обеспечивающие принудительное движение теплоносителя по контуру. Таким образом, движение теплоносителя в контуре создается только за счет неравномерного распределения температуры теплоносителя по длине контура. Неравномерное распределение температуры теплоносителя по длине контура может обеспечиваться за счет:

- локального по длине контура подвода и отвода тепла;
- распределенного по длине контура подвода и отвода тепла;

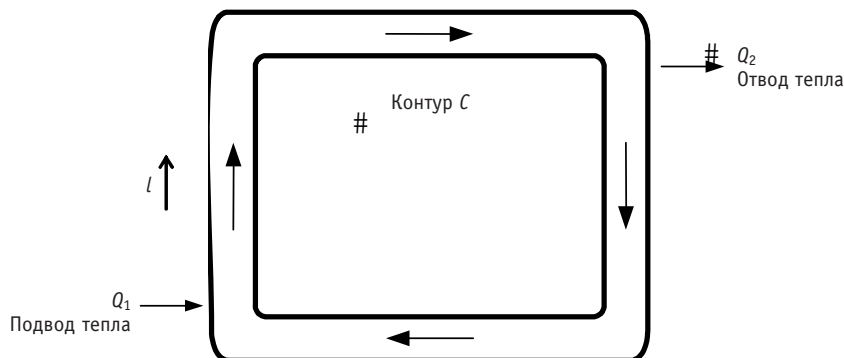


Рис. 1. Простой односвязный замкнутый контур циркуляции

- исходного неравномерного распределения температуры теплоносителя по длине контура;

- динамического изменения величины подводимого/отводимого тепла в контуре.

На данной стадии рассмотрения нам неважно, каким образом создается неравномерное распределение по длине контура температуры теплоносителя, циркулирующего в нем. При этом полагаем, что первоначально температура теплоносителя является функцией только продольной координаты l , отсчитываемой вдоль контура, т.е. в любом поперечном сечении контура теплоноситель вначале имеет одинаковую температуру.

МЕХАНИЗМЫ ВОЗНИКНОВЕНИЯ СВОБОДНО-КОНВЕКТИВНЫХ ТЕЧЕНИЙ В ЗАМКНУТОМ КОНТУРЕ

Как было отмечено выше, мы ограничиваемся рассмотрением СКТ теплоносителя, направленных вдоль контура, или естественной циркуляции, источником которой является перепад давления по контуру, обусловленный неизотермичностью теплоносителя. Этот перепад давления принято называть термическим напором ЕЦ.

Перейдем к рассмотрению конкретных механизмов, приводящих к возникновению тех или иных форм ЕЦ.

Общеконтурная естественная циркуляция

До сих пор при анализе ЕЦ, как правило, используется традиционное одномерное представление для замкнутого контура циркуляции теплоносителя. В рамках такого приближения рассматривается одномерное поле температуры теплоносителя в контуре циркуляции и одномерное течение теплоносителя, которое характеризуется единым значением расхода ЕЦ в контуре. Данную классическую форму ЕЦ теплоносителя условимся называть *общеконтурной естественной циркуляцией* (ОЕЦ) в связи с тем, что она реализуется по длине всего рассматриваемого замкнутого контура.

В качестве основных характерных признаков ОЕЦ в односвязном замкнутом контуре следует выделить:

- наличие направленного перемещения массы теплоносителя по контуру (в общем случае не равно нулю), сопровождающегося переносом тепла вдоль контура (в каждый момент времени направление ОЕЦ одно и то же в каждой точке контура);
- одинаковое значение расхода ОЕЦ через любое поперечное сечение контура (вытекает из закона сохранения массы теплоносителя).

Расход ОЕЦ определяется исходя из термического напора ОЕЦ в контуре и суммарного гидравлического сопротивления контура с учетом инерционности теплоносителя.

Термический напор ОЕЦ представляет собой интеграл, вычисленный для удельного веса теплоносителя по рассматриваемому замкнутому контуру циркуляции C (рис. 1):

$$\Delta P_t(\tau) = \oint_C \rho_c(\bar{T}_c) \cdot \vec{g} \cdot d\vec{l}, \quad (1)$$

где l – пространственная координата, отсчитываемая вдоль контура, м; τ – время, с; $\Delta P_t(\tau)$ – термический напор ОЕЦ в момент времени τ , Па; $\bar{T}_c(l, \tau)$ – температура теплоносителя, усредненная по площади проходного сечения контура в точке контура с координатой l , °C; $\rho_c(\bar{T}_c)$ – плотность теплоносителя при средней по проходному сечению контура температуре теплоносителя в точке контура с координатой l , кг/м³; g – ускорение свободного падения, м/с².

Таким образом,

$$F_0 \frac{dG_{\text{ОЕЦ}}(\tau)}{d\tau} = \Delta P_t(\tau) - \Delta P_\xi(\tau), \quad (2)$$

где $G_{\text{ОЕЦ}}(\tau)$ – расход ОЕЦ в момент времени τ , кг/с; $\Delta P_{\xi}(\tau)$ – суммарное гидравлическое сопротивление контура циркуляции в момент времени τ , Па; F_0 – коэффициент инерционности теплоносителя в контуре, 1/м.

Такой одномерный подход не учитывает распределение скорости и температуры теплоносителя по поперечному сечению элементов замкнутого контура, а рассматривает только осредненные значения скорости и температуры теплоносителя в каждом поперечном сечении контура, т.е. описанный механизм, приводящий к возникновению ОЕЦ, не учитывает пространственные размеры поперечного сечения рассматриваемого контура.

Локальная естественная циркуляция

Попытаемся проанализировать возможный характер ЕЦ теплоносителя в контуре с учетом поперечных размеров элементов контура. Будем использовать для характеристики поперечных размеров контура величину радиуса трубопроводов, образующих контур. Замкнутый контур циркуляции может иметь как горизонтально, так и вертикально расположенные участки. Проанализируем каждый из них на предмет возможного возникновения других форм СКТ теплоносителя, отличных от ОЕЦ.

Возьмем горизонтальный участок контура радиусом r (рис. 2) и рассмотрим ситуацию, когда расход ОЕЦ в контуре равен нулю (это может быть обеспечено, например, путем разрыва циркуляции теплоносителя в контуре). Отсутствие движения теплоносителя на горизонтальном участке свидетельствует о равенстве давлений на его концах (P_0 на уровне оси трубопровода). Теперь создадим на концах этого горизонтального участка различающиеся условия по температуре (например, температура теплоносителя на левой стороне участка T_1 выше, чем температура теплоносителя на правой его стороне T_2). Определим давления в верхней и нижней точках трубопровода на краях участка с учетом плотности теплоносителя при заданных температурах. Пусть плотность теплоносителя при температуре T_1 составляет ρ_{c1} , а при температуре T_2 – ρ_{c2} ($\rho_{c1} < \rho_{c2}$). С учетом этого получаем (рис. 2):

$$P_1^t = P_0 - \rho_{c1} \cdot g \cdot r, \quad (3)$$

$$P_1^b = P_0 - \rho_{c1} \cdot g \cdot r, \quad (4)$$

$$P_2^t = P_0 - \rho_{c2} \cdot g \cdot r, \quad (5)$$

$$P_2^b = P_0 - \rho_{c2} \cdot g \cdot r, \quad (6)$$

где P_1^t, P_1^b – давление теплоносителя в верхней и нижней точках левого края участка, Па; P_2^t, P_2^b – давление теплоносителя в верхней и нижней точках правого края участка, Па.

Очевидно, что $P_1^t > P_2^t$ и $P_1^b < P_2^b$. Возникающие перепады давлений приведут к противоположно направленному движению теплоносителя в верхней и нижней областях участка. В результате образуется замкнутый локальный контур циркуляции теплоносителя (рис. 2). Течение теплоносителя в этом контуре в основном направлено вдоль контура за исключением краевых участков, где течение теплоносителя реали-

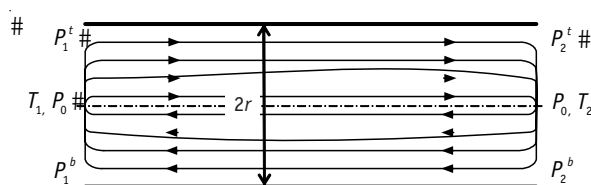


Рис. 2. Контур ЛЕЦ на горизонтальном участке замкнутого контура ($T_1 > T_2$)

зуется в поперечных сечениях контура. В случае, если $T_1 < T_2$, локальный замкнутый контур циркуляции будет иметь противоположное направление движения теплоносителя.

Возможность возникновения подобного контура ЕЦ описана в работе [5].

В качестве характерных особенностей такой формы СКТ теплоносителя следует отметить следующие:

- наличие локального замкнутого контура циркуляции на участке означает, что величины расхода теплоносителя на верхнем и нижнем участках контура равны;
- в отличие от ОЕЦ отсутствует направленное перемещение массы теплоносителя на рассматриваемом участке контура, т.к. суммарный расход теплоносителя через любое поперечное сечение участка равен нулю;
- существует определенный перенос тепла вдоль участка – от края с большей температурой к краю с меньшей температурой, который обусловлен тем, что температура теплоносителя, текущего в верхней части, выше температуры теплоносителя, текущего в нижней части участка.

В отличие от ОЕЦ данную форму СКТ теплоносителя условимся называть *локальной естественной циркуляцией* (ЛЕЦ) в связи с тем, что она возникает на отдельных участках контура, а не охватывает весь контур.

Термический напор ЛЕЦ представляет собой интеграл, вычисленный для удельного веса теплоносителя по рассматриваемому замкнутому контуру циркуляции C_{Lg} (рис. 2):

$$\Delta P_t^g = \oint_{C_{Lg}} \rho_c(T) \cdot \vec{g} \cdot d\vec{l} \approx 2 \cdot (\rho_{c2} - \rho_{c1}) \cdot g \cdot r. \quad (7)$$

Аналогично могут образовываться замкнутые локальные контуры циркуляции на вертикальных участках контура.

Рассмотрим вертикальный участок контура высотой h (рис. 3) в условиях, когда расход ОЕЦ в контуре равен нулю. Создадим на концах данного участка перепад температур так, что температура теплоносителя в нижней части участка T_1 выше, чем температура теплоносителя в его верхней части T_2 ($T_1 > T_2$). Более легкий теплоноситель с температурой T_1 будет стремиться подняться вверх, а более тяжелый теплоноситель с температурой T_2 будет опускаться вниз, образуя замкнутый контур ЛЕЦ на вертикальном участке C_{Lv} (рис. 3). Возможны два варианта замыкания контура ЛЕЦ на вертикальном участке: вариант 1 – с центральной симметрией – подъемное течение теплоносителя в центре и опускное на периферии (рис. 3а) и вариант 2 – без центральной симметрии, при котором в одной половине проходного сечения реализуется опускное течение теплоносителя, а в другой – подъемное (рис. 3б).

Пусть средняя плотность теплоносителя на подъемном участке локального контура равна ρ_{c1} , а на опускном – ρ_{c2} ($\rho_{c1} < \rho_{c2}$). С учетом этого получаем выражение для определения величины термического напора ЛЕЦ на вертикальном участке (рис. 3):

$$\Delta P_t^{Lv} = \oint_{C_{Lv}} \rho_c(T) \cdot \vec{g} \cdot d\vec{l} \approx (\rho_{c2} - \rho_{c1}) \cdot g \cdot h. \quad (8)$$

Для любого из образующихся контуров ЛЕЦ (как на горизонтальных, так и на вертикальных участках контура) расход теплоносителя определяется, исходя из термического напора ЛЕЦ, создаваемого на участке, и гидравлического сопротивления образуемого i -го контура ЛЕЦ с учетом инерционности теплоносителя в данном контуре:

$$F_i \frac{dG_{ЛЕЦ}^i(\tau)}{d\tau} = \Delta P_t^{L_i}(\tau) - \Delta P_{\xi_{L_i}}(\tau), \quad (9)$$

где $G_{ЛЕЦ}^i(\tau)$ – расход ЛЕЦ в i -ом контуре циркуляции в момент времени τ , кг/с;

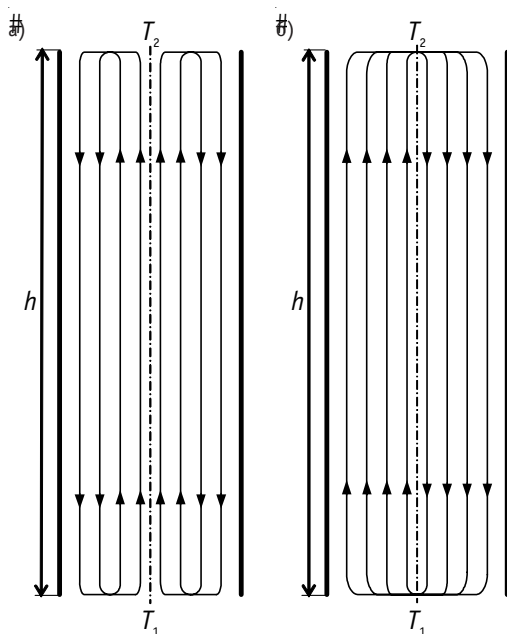


Рис. 3. Контур ЛЕЦ на вертикальном участке замкнутого контура ($T_1 > T_2$): а) – вариант 1; б) – вариант 2

$\Delta P_t^{L_i}(\tau)$ – термический напор ЛЕЦ в момент времени τ , Па; $\Delta P_{\xi_i}(\tau)$ – суммарное гидравлическое сопротивление i -го контура ЛЕЦ в момент времени τ , Па; F_i – коэффициент инерционности теплоносителя в i -ом контуре ЛЕЦ, 1/м.

ЛЕЦ на вертикальном участке обладает такими же свойствами, что и ЛЕЦ на горизонтальном участке, а именно, направленным переносом тепла на участке при отсутствии направленного перемещения массы теплоносителя.

Из сравнения условий развития ЛЕЦ на горизонтальных и вертикальных участках контура видно, что эффективная высота, создающая термический напор ЛЕЦ на горизонтальном участке, равняется диаметру трубопровода ($2r$), а эффективная высота, создающая термический напор ЛЕЦ на вертикальном участке, равняется его высоте h . Поскольку обычно

$h > 2r$, то при прочих равных условиях расход ЛЕЦ на вертикальных участках будет, как правило, больше, чем на горизонтальных участках.

На наклонных участках замкнутого контура условия для возникновения ЛЕЦ будут такие же, как и для вертикальных участков с реализацией второго варианта замыкания контура ЛЕЦ (при этом в более верхней половине проходного сечения образуется восходящее течение теплоносителя, а в более нижней – нисходящее (рис. 4)).

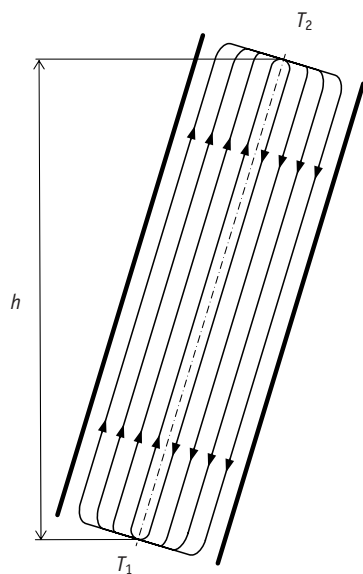


Рис. 4. Контур ЛЕЦ на наклонном участке замкнутого контура ($T_1 > T_2$)

В реальных контурах свободно-конвективные течения теплоносителя в отличие от представленных здесь двумерных схем СКТ будут иметь более сложную трехмерную структуру. Однако для нас представляется важным выявление тех существенных принципиальных особенностей структуры этих СКТ, которые приводят к переносу тепла вдоль контура, и описание механизмов, приводящих к возникновению такого переноса тепла.

Если в замкнутом контуре возникает один контур ОЕЦ, то контуров ЛЕЦ может возникать несколько в границах одного замкнутого контура.

Рассмотрим, при каких условиях могут возникать контуры ЛЕЦ в предположении, что ОЕЦ в контуре отсутствует. Для возникновения ЛЕЦ в отличие от ОЕЦ не требуется наличия замкнутого контура циркуляции для теплоносителя и поддержания неравновесного потока теплоносителя в нем. Как показали эксперименты на реакторе БН-350, ЛЕЦ может возникать в петлях с разорванным контуром циркуляции теплоносителя.

Для возникновения ЛЕЦ на горизонтальном участке контура достаточно поддерживать разницу температур на его концах. В отличие от горизонтальных участков, для которых единственным необходимым и достаточным условием для возникновения ЛЕЦ является наличие разности температур на краях участка, на вертикальных участках ЛЕЦ возникает только в тех случаях, когда температура теплоносителя на верхнем краю участка меньше температуры теплоносителя на нижнем краю участка ($T_1 < T_2$). В противоположном случае ($T_1 > T_2$) локальное свободно-конвективное течение теплоносителя на вертикальном участке контура не возникает.

Таким образом, если на горизонтальных участках перенос тепла за счет ЛЕЦ может осуществляться в обоих направлениях, то на вертикальных участках перенос тепла посредством ЛЕЦ может осуществляться только в направлении снизу вверх, т.е. вертикальные участки контура обладают диодным эффектом по отношению к ЛЕЦ теплоносителя.

СУПЕРПОЗИЦИЯ РАЗЛИЧНЫХ ФОРМ СВОБОДНО-КОНВЕКТИВНЫХ ТЕЧЕНИЙ

В предыдущем разделе описаны возможные формы СКТ теплоносителя в замкнутом контуре, которые обеспечивают перенос тепла вдоль контура. Анализ механизмов возникновения каждой из этих двух форм СКТ был проведен при условии отсутствия другой формы свободно-конвективного течения теплоносителя, т.е. изолированно друг от друга. В действительности, обе эти формы СКТ будут реализовываться в замкнутом контуре одновременно и определенным образом накладываться друг на друга. Данный раздел посвящен анализу взаимодействия описанных видов СКТ друг с другом и их суперпозиции.

Отметим, что до некоторой степени характер взаимодействия ОЕЦ и ЛЕЦ соответствует режиму смешанного течения, когда свободно-конвективное течение взаимодействует с принудительным течением теплоносителя. В нашем случае в качестве принудительного течения теплоносителя выступает ОЕЦ. Задача усложняется тем обстоятельством, что ОЕЦ соответствует режиму принудительного течения теплоносителя с переменным напором, определяемым существующими обратными связями.

Рассмотрим, каким образом будут влиять друг на друга ОЕЦ и ЛЕЦ на горизонтальном участке контура. Существование определенного расхода ОЕЦ в замкнутом контуре свидетельствует о наличии определенного перепада давления по длине контура, обеспечивающего данный расход ОЕЦ. Пусть на некотором горизонтальном участке контура существующий в контуре расход ОЕЦ обеспечивается перепадом давления $\Delta P = P_1 - P_2$ ($P_1 > P_2$).

Рассмотрим вариант (рис. 5а), когда температура теплоносителя, вытекающего из участка T_2 выше, чем температура теплоносителя на входе в участок T_1 ($T_2 > T_1$). Пусть плотность теплоносителя при температуре T_1 равна ρ_{c1} , а при температуре T_2 – ρ_{c2} ($\rho_{c1} > \rho_{c2}$). С учетом этого имеем (рис. 5а):

$$P_1^t = P_1 - \rho_{c1} \cdot g \cdot r, \quad (10)$$

$$P_1^b = P_1 - \rho_{c1} \cdot g \cdot r, \quad (11)$$

$$P_2^t = P_2 - \rho_{c2} \cdot g \cdot r = P_1 - \Delta P - \rho_{c2} \cdot g \cdot r, \quad (12)$$

$$P_2^b = P_2 + \rho_{c2} \cdot g \cdot r = P_1 - \Delta P + \rho_{c2} \cdot g \cdot r, \quad (13)$$

где P_1^t , P_1^b – давление теплоносителя в верхней и нижней точках поперечного сечения на входе в участок, Па; P_2^t , P_2^b – давление теплоносителя в верхней и нижней точках поперечного сечения на выходе из участка, Па.

В нижней области участка, как и в центральной, направление течения теплоносителя совпадает с направлением ОЕЦ, т.к. $P_1^b > P_2^b$. Для верхней области горизонталь-

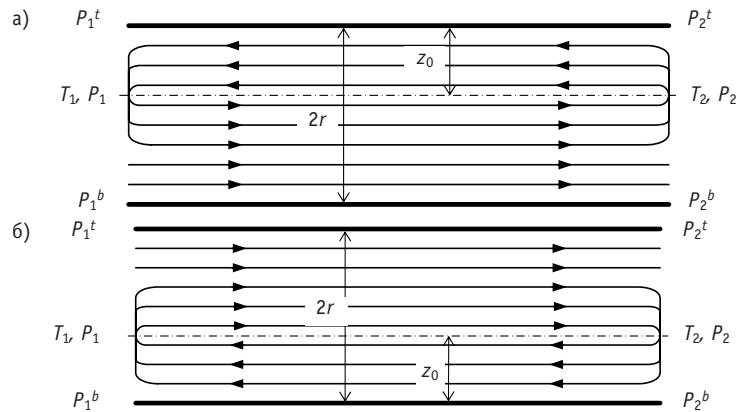


Рис. 5. Суперпозиция ОЕЦ и ЛЕЦ на горизонтальном участке замкнутого контура: а) – $T_1 < T_2$; б) – $T_1 > T_2$

ного участка возможны два варианта. Если $P_1^t > P_2^t$, то по всему поперечному сечению горизонтального участка реализуется расход ОЕЦ (с возможным искажением профиля скорости по поперечному сечению участка, который определяется существующим распределением по высоте давления теплоносителя на краях участка). В случае, если $P_1^t < P_2^t$, в верхней части горизонтального участка возникает течение теплоносителя в направлении, противоположном направлению ОЕЦ (рис. 5а). В итоге это приводит к образованию в верхней области горизонтального участка замкнутого контура ЛЕЦ, который вытесняет поток теплоносителя ОЕЦ в нижнюю часть горизонтального участка. Нижняя высотная отметка возвратного течения теплоносителя в контуре ЛЕЦ находится из условия

$$P_1 - \rho_{c1} \cdot g \cdot (r - z_0) = P_1 - \Delta P - \rho_{c2} \cdot g \cdot (r - z_0),$$

где z_0 – высотная отметка, отсчитываемая вниз от верхней точки поперечного сечения трубопровода.

Получаем, что

$$z_0 = r - \frac{\Delta P}{(\rho_{c1} - \rho_{c2}) \cdot g}. \quad (14)$$

Таким образом, если $z_0 < 0$, на горизонтальном участке реализуется только режим ОЕЦ, в противном случае ($z_0 > 0$) на участке наряду с ОЕЦ возникает ЛЕЦ в верхней области горизонтального участка.

Рассмотрим вариант (рис. 5б), когда температура теплоносителя, вытекающего из участка T_2 ниже, чем температура теплоносителя на входе в участок T_1 ($T_2 < T_1$). Тогда $\rho_{c1} < \rho_{c2}$. Значения давления на краях участка определяются в соответствии с формулами (10)–(13).

В верхней области горизонтального участка, как и в центральной, направление течения теплоносителя совпадает с направлением ОЕЦ, т.к. $P_1^t > P_2^t$. Для нижней части участка возможны два варианта. Если $P_1^b > P_2^b$, то по всему поперечному сечению горизонтального участка реализуется расход ОЕЦ. В случае, если $P_1^b < P_2^b$, в нижней части горизонтального участка возникает течение теплоносителя в направлении, противоположном направлению ОЕЦ (рис. 5б). В итоге это приводит к образованию в нижней области рассматриваемого горизонтального участка замкнутого контура ЛЕЦ, который вытесняет поток теплоносителя ОЕЦ в верхнюю часть горизонтального участка. Верхняя высотная отметка возвратного течения теплоносителя в контуре ЛЕЦ находится так же, как и в предыдущем варианте:

$$P_1 + \rho_{c1} \cdot g \cdot (r - z_0) = P_1 - \Delta P + \rho_{c2} \cdot g \cdot (r - z_0),$$

где z_0 – высотная отметка, отсчитываемая вверх от нижней точки поперечного сечения трубопровода.

Получаем, что

$$z_0 = r - \frac{\Delta P}{(\rho_{c2} - \rho_{c1}) \cdot g}. \quad (15)$$

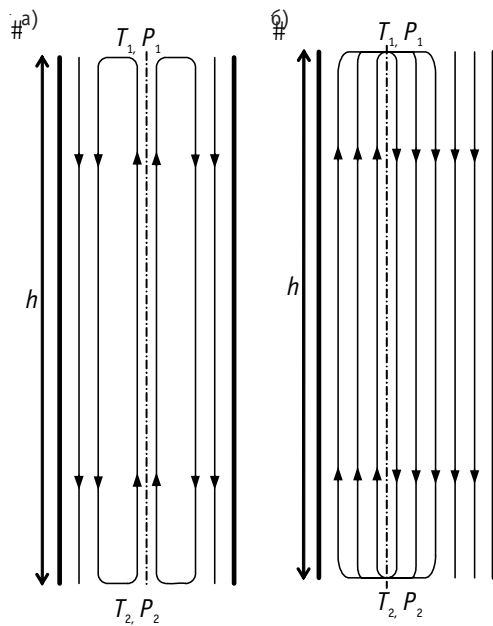


Рис. 6. Суперпозиция ОЕЦ и ЛЕЦ на вертикальном участке замкнутого контура (опускное течение ОЕЦ): а) – вариант 1; б) – вариант 2

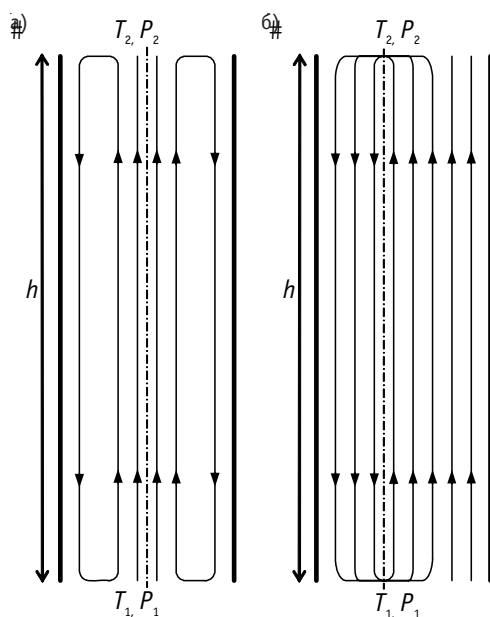


Рис. 7. Суперпозиция ОЕЦ и ЛЕЦ на вертикальном участке замкнутого контура (подъемное течение ОЕЦ): а) – вариант 1; б) – вариант 2

Как и в предыдущем случае, если $z_0 < 0$, на горизонтальном участке реализуется только режим ОЕЦ, в противном случае ($z_0 > 0$) на участке наряду с ОЕЦ возникает ЛЕЦ в нижней части горизонтального участка.

Перейдем к рассмотрению взаимодействия ОЕЦ и ЛЕЦ на вертикальном участке контура. При определенном, не равном нулю расходе ОЕЦ в замкнутом контуре, на рассматриваемом вертикальном участке реализуется перепад давления, который обеспечивает данный расход ОЕЦ в пределах этого вертикального участка. Пусть этот перепад давления равен $\Delta P = P_1 - P_2$, где P_1 – давление теплоносителя на входе в вертикальный участок (по направлению расхода ОЕЦ), а P_2 – соответственно давление теплоносителя на выходе из вертикального участка.

Рассмотрим вначале вариант с опускным направлением ОЕЦ на участке (рис. 6). В этом случае $P_1 + \rho_c \cdot g \cdot h > P_2$, где ρ_c – плотность теплоносителя на участке. Пусть температура теплоносителя на входе в участок T_1 , а на выходе из участка T_2 ($T_1 < T_2$); средняя плотность теплоносителя на опускном участке локально – ρ_{c1} , а на подъемном – ρ_{c2} ($\rho_{c1} > \rho_{c2}$). Выполнение неравенства $P_1 + \rho_{c2} \cdot g \cdot h < P_2$ является условием для существования подъемного течения теплоносителя на участке и соответственно возникновения контура ЛЕЦ (рис. 6а – вариант 1, рис. 6б – вариант 2). В случае, если $P_1 + \rho_{c2} \cdot g \cdot h > P_2$, то это означает, что по всему поперечному сечению вертикального участка существует только опускное течение ОЕЦ.

Рассмотрим теперь вариант с подъемным направлением ОЕЦ на участке (рис. 7).

Для этого случая $P_1 > P_2 + \rho_c \cdot g \cdot h$. Температура теплоносителя на входе в участ-

ток T_1 выше температуры на выходе из участка T_2 ($T_1 > T_2$). Пусть средняя плотность теплоносителя на опускном участке локального контура составляет ρ_{c2} , а на подъемном – ρ_{c1} ($\rho_{c1} < \rho_{c2}$). Вы-полнение неравенства $P_1 < P_2 + \rho_{c2} \cdot g \cdot h$ является условием для существования опускного течения теплоносителя на участке и соответственно возникновения на этом участке контура ЛЕЦ (рис. 7а – вариант 1, рис. 7б – вариант 2). Выполнение условия $P_1 > P_2 + \rho_{c2} \cdot g \cdot h$ означает, что по всему поперечному сечению вертикального участка существует только подъемное течение ОЕЦ.

Проведенное исследование характера суперпозиции ОЕЦ и ЛЕЦ показывает, что в случае реализации обеих форм СКТ в замкнутом теплоотводящем контуре одномерное представление температурного поля теплоносителя по длине контура не позволяет точно описать возникающий режим ЕЦ. Для корректного описания таких режимов ЕЦ необходимо учитывать возникающую стратификацию температуры теплоносителя по проходному сечению контура.

В данной работе не рассматривались вопросы взаимодействия друг с другом контуров ЛЕЦ, возникающих на соседних участках, влияния параметров теплоотводящего контура и его конфигурации на протяженность контуров ЛЕЦ и их количество, также не ставилась задача выявления детальной структуры течения теплоносителя в возникающих контурах ЕЦ. Рассмотрение этих вопросов требует отдельного исследования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненный в данной работе анализ возможных форм СКТ теплоносителя в замкнутом теплоотводящем контуре показал, что наряду с общекартурной ЕЦ теплоносителя могут возникать локальные контуры ЕЦ.

Исследованы механизмы возникновения контуров ЛЕЦ на различных участках теплоотводящего контура (горизонтальный, вертикальный, наклонный) и их суперпозиции с ОЕЦ. Сформулированы критерии возникновения ЛЕЦ теплоносителя в условиях ОЕЦ как на горизонтальных, так и вертикальных участках контура.

Показано, что традиционное моделирование режимов ЕЦ в виде ОЕЦ верно лишь в отдельных случаях. В общем случае наряду с ОЕЦ должна учитываться и ЛЕЦ теплоносителя.

Требуют дальнейшего изучения вопросы взаимодействия между собой соседних контуров ЛЕЦ и определения факторов, влияющих на количество контуров ЛЕЦ, их протяженность на различных участках замкнутого контура.

Литература

1. Уолтер А., Рейнольдс А. Реакторы-размножители на быстрых нейтронах (пер. с англ.). – М.: Энергоатомиздат, 1986.
2. Митенков Ф.М., Моторов Б.И., Моторова Э.А. Устойчивость естественного тепломассопереноса. – М.: Атомиздат, 1976.
3. Митенков Ф.М. и др. Инженерные методы анализа режимов с естественной циркуляцией в установках типа БН//Атомная энергия. – 1987. – Т. 62. – Вып. 3. – С. 147-152.
4. Gregory C.V. Passive and Engineered Safety Features of the Prototype Fast Reactor (PFR), Dounreay/Proc. of the IAEA Specialists Meeting on Passive and Active Safety Features of LMFRs (Oarai, Japan, Nov. 1991). – P. 60-63.
5. Гебхарт Б., Джалурия Й., Махаджан Р.Л., Саммакия Б. Свободноконвективные течения, тепло- и массообмен (в 2-х кн.) (пер. с англ.). – М.: Мир, 1991.

Поступила в редакцию 23.01.2007

enrichment process. These difficulties can become practically insuperable depending on ^{232}U concentration.

УДК 621.039.54

Exploring of Non-Wasted Fuel Cycle of the Ball-Poured Core of the Sodium-Cooled Fast Reactor \ G.B. Usynin, A.A. Kravchenko; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2007. – 6 pages, 3 tables, 2 illustrations. – References – 4 titles.

The calculation of the non-wasted fuel cycle of the ball-poured fast reactor is presented. This fuel cycle contains two types of the reprocessing of the fuel – full and particular. By the full reprocessing pyroprocessing and other chemical operations are used. By the particular reprocessing, only physical and mechanical, and the part of the gas and flying fusion products are extracted.

УДК 621.039.543.6

The Input of an (α, n) Reaction Estimation to an Integral Neutron Intensities of WWER-1000 Spent Fuel \ I.V. Shamanin, M.E. Silaev, S.V. Bedenko, V.V. Martynov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2007. – 8 pages, 1 table, 3 illustrations. – References – 15 titles.

All nuclear processes resulting to neutron generation within a spent fuel are examined. Total neutron intensity per weight unit of WWER-1000 spent fuel caused by (α, n) reactions and spontaneous fissions of uranium and transuranium nucleus proceeding were determined. Inputs of (α, n) reactions to entire neutron intensity of WWER-1000 spent fuel was estimated according with his burn-up degree.

УДК 621.039.553.34

Analysis of Possible Types of Natural Convection Flows in a Closed Circuit \ Yu.M. Ashurko; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2007. – 11 pages, 7 illustrations. – References – 5 titles.

The paper is devoted to the analysis of the possible types and mechanisms of occurrence of natural convection flows of a single-phase incompressible liquid in a closed circuit. It has been shown that alongside of a common-circuit coolant natural circulation the local closed circuits of natural circulation can exist in some parts of the circuit. The conditions of occurrence of local natural circulation of the coolant in horizontal and vertical parts of the closed circuit and principles of a superposition of the common-circuit and local natural circulation are described.

УДК 621.039.534

Experimental Research of the Processes Accompanying Emergency Receipt of Organic Connections (oil) to the Lead-Bismuth and Lead Heat-Carrier \ A.V. Beznosov, I.V. Karatushina; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2007. – 10 pages, 1 table, 6 illustrations.

Results of experimental and theoretical researches of the processes accompanying emergency receipt of organic connections – oil from the back sealing system of a shaft and circulating pumps bearings of lead-bismuth and lead heat-carrier power contours of nuclear reactors, thermonuclear reactors and accelerating-control systems are presented.

УДК 621.039.534

Results of Simultaneous Dissolution of UO_2 and ZrO_2 by Molten Zircaloy \ A.M. Svyatkin, V.V. Tikhomirov, V.V. Yakovlev, V.P. Smirnov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2007. – 10 pages, 1 table, 8 illustrations. – References – 6 titles.

Based on the experimental examination performed at RIAR rates of ZrO_2 and UO_2 dissolution by molten Zircaloy at 2100 and 2200°C were estimated. A high-temperature facility for specimen testing has been developed; experiments and post-testing examinations of the obtained compositions were carried out. The results were introduced into the experimental data array of the SVECHA calculation