

УДК 532. 135; 532.5

Белецкий Э.В., Толчинский Ю.А.

ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ КОЭФФИЦИЕНТОВ ТРЕНИЯ И ТЕПЛООТДАЧИ ДЛЯ НЕКОТОРЫХ МОДЕЛЕЙ НЕНЬЮТОНОВСКИХ ЖИДКОСТЕЙ

Постановка проблемы в общем виде. Большинство процессов пищевой промышленности связано с переработкой дисперсных систем, суспензии, коллоидных растворов, различных вязкопластических материалов.

При расчете процессов пищевой технологии большое значение имеют параметры, при которых осуществляется протекание технологических процессов, а именно давление, температура, скорость течения [1, 2]. При этих умеренных значениях параметров сами пищевые материалы могут претерпевать весьма значительные изменения. В полной мере сказанное относится к реологии [1, 2]. Последняя выступает как определяющая в таких процессах, как движение пищевых материалов в каналах и трубах транспортирующих устройств, машин и аппаратов различного назначения. Эти движения часто сопровождаются процессами поглощения, выделения или передачи тепла. Во всех этих процессах реология формирует поле течения, структура которого определяет коэффициенты трения, местного сопротивления и теплоотдачи.

Существующие виды течений могут быть условно разбиты на два следующих подмножества: подмножество течений в каналах машин и аппаратов, и подмножество течений в трубопроводах. Для течений в каналах в роли движущей силы выступают разность давлений на границах каналов и (или) движения границ каналов, выступающих представителями рабочих поверхностей. Для течений в трубах источником движения выступает только перепад давлений в начале и в конце трубопровода. К последнему случаю относятся также течения теплоносителей.

Анализ последних исследований и публикаций. В пищевой технологии известно огромное число феноменологических реологических моделей описывающих поведение тех или иных материалов [1, 2]. Для этих моделей характерно наличие сложных зависимостей между напряжением сдвига, скоростью сдвига и температурой (реже – давлением). Наряду с таким подходом, в котором для каждого отдельного материала и ситуации его использования подбирается соответствующее уравнение его реологического состояния, хотя может иметь место и иной подход. Суть его состоит в том, что целью является изучение нескольких достаточно простых реологических моделей, которые, однако, обладают большой репрезентативностью для того, чтобы быть пригодными в большом числе ситуаций инженерной практики.

Цель и задачи статьи. Представляется достаточно обоснованным рассматривать в связи со сказанным, такие модели: модель жидкости, вязкость которой зависит от скорости сдвига (для течения типа Куэтта) или, в общем случае, от второго инварианта тензора скорости деформаций (для сложного течения); модель бингамовской жидкости, пороговое напряжение сдвига которой зависит от давления. В модели жидкости с зависимостью вязкости от скорости сдвига параметры уравнения реологического состояния могут зависеть от температуры [3, 4, 5].

Изложение основного материала исследования. Задачи, которые уместно ставить для жидкостей, реология которых подчинена таким моделям, могут быть упорядочены и представлены некоторой иерархией, в основе которой лежат задачи продольных течений в трубах и каналах. Детальное описание течений в таких областях, позволяет

решать задачи в более сложных областях (имеется ввиду сложность геометрии). При этом необходимо следовать общей гидродинамической схеме анализа течений в каналах и трубах. Схема имеет два уровня описания: собственно, гидродинамический и гидравлический [6, 7, 8, 9]. Гидродинамический уровень описания – подробный поточный, что локальный, т.к. информация о течении предоставляется в каждой точке. Гидравлический уровень описания – сокращенный. При этом вся локальная информация о течении теряется, а само течение характеризуется интегрально – с помощью соотношения, связывающего между собой перепад давлений и среднюю скорость (или расход) течения. Из гидродинамического уровня описания следует гидравлический, но не наоборот. При постановке задач течения в канале, естественным образом возникают как типичные, следующие граничные условия (см. рисунок 1. а и б):

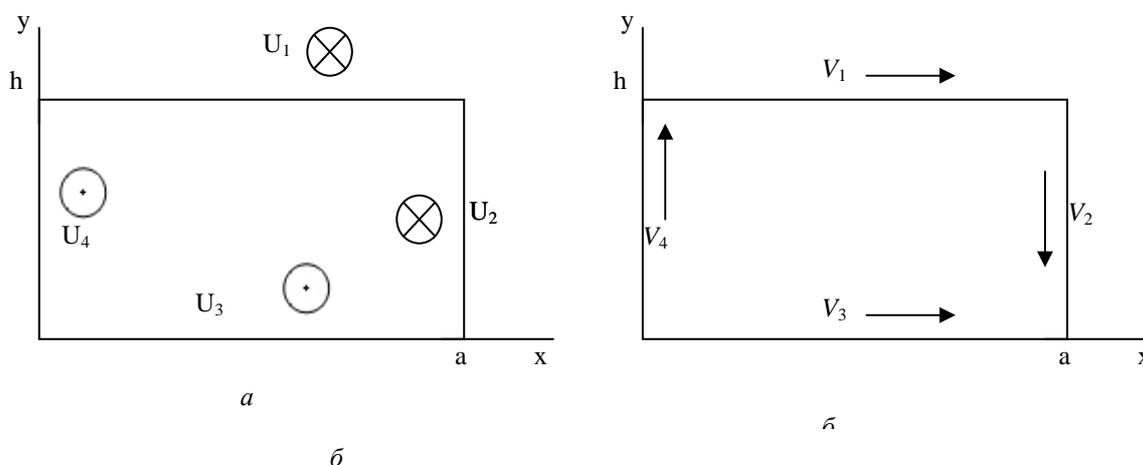


Рисунок 1 – Граничные условия в канале:
 а – продольные условия; б – поперечные условия

На рис. 1 изображен. В качестве типичного, прямоугольный канал, к границам которого приложены продольные и поперечные скорости; продольные скорости обозначены как u_i ($i=1 \div 4$), поперечные скорости обозначены как v_j ($j=1 \div 4$). Направления скорости указаны кружками и стрелками как в этом конкретном примере, но могут быть каким угодно. Постановка задач о течении в трубе предусматривает только нулевые граничные условия, а форма трубы обычно бывает круглой так, что сечение трубы – или круг, или кольцо.

Течение ньютоновской жидкости в каналах и трубах было изучено подробно на гидродинамическом уровне, для многих областей следствием чего стало возможным и описание на гидравлическом уровне [10, 11, 12, 13]. Гидродинамическое описание приводит к зависимости характеристик течения от числа Рейнольдса. Инженерная практика свидетельствует о том, что течения в каналах целесообразно изучать при малых значениях числа Рейнольдса, когда течения являются стоксовыми [10, 11, 13]. Течения в трубах, представляющие практический интерес, следует рассматривать в широком диапазоне изменения числа Рейнольдса [6, 7, 8, 9]. Этот диапазон охватывает как стоксовый, так и инерционный, и турбулентный режимы течения. Результатом такого рассмотрения является гидравлическое описание, которые характеризует течение всего двумя параметрами – коэффициентом сопротивления трения и коэффициентом местно-

го сопротивления. Для этих параметров изучена их зависимость от числа Рейнольдса, а результаты изучения отражены в большом количестве книг и справочников [7, 8, 9].

Течения в трубах и каналах помимо такой своей характеристики как режим течения, имеют и другую сторону: они могут быть установившимися или неустановившимися. Здесь имеется ввиду следующее: течение в каналах и трубах имеет, по преимуществу, продольный характер. Для ньютоновских жидкостей установлено теоретически и экспериментально, что, по мере продвижения по каналу или трубе, течение вырождается во вполне определенное (называемое пуазейлевским или квазипуазейлевским). Термин «вырождение» означает, что каким бы ни было течение ньютоновской жидкости на входе в канал или трубу, по мере того, как она пройдет достаточно большое расстояние от входа, течение будет все больше приближаться к одному единственному течению, «забывая» о том, каким оно было на входе. Длина, на которой возникает это единственное, по сути, предельное течение, называется длиной стабилизации или установления [8, 9]. Эта длина зависит от значения числа Рейнольдса, характерного поперечного размера канала и демонстрирует тенденцию увеличиваться с увеличением этого числа. Наличие длины стабилизации течения оказывает определяющее влияние на величины коэффициента сопротивления трения, теплоотдачи. Основной массив сведений о коэффициентах сопротивления трения, местных потерь и теплоотдачи относится к полностью стабилизированным течениям в каналах и трубах. Это, безусловно, следует считать уместным в тех случаях, в которых длины труб и каналов значительно превосходят длины участков стабилизации, т.е. верно для протяженных трубопроводов. Для небольших трубопроводов и каналов, составляющих части машин и аппаратов пищевой промышленности это условие выполняется с большой погрешностью. Перенос же результатов, полученных для стабилизированных течений на нестабилизированные недопустим, так как приводит к существенным ошибкам при подсчете потерь давления и величины тепловых потоков.

Как правило, течения в трубах и каналах сопровождаются переносом тепла. Тепловые процессы также можно описывать на двух уровнях – локальном и интегральном. На локальном уровне решение уравнения переноса температуры позволяет найти ее значение в каждой точке области переноса. Интегральный уровень аналогичен гидравлическому и, теряя локальную информацию, сохраняет интегральную в виде коэффициента теплоотдачи [8, 9, 14]. С помощью этого коэффициента вычисляется плотность теплового потока на границе канала или трубы. Коэффициент теплоотдачи целиком формируется теплофизическими характеристиками жидкости и локальными свойствами ее течения вблизи границы.

Течения ньютоновской жидкости в каналах и трубах обладает определенной структурой. Это означает, что вся область течения может быть разбита на подобласти с принципиально различными течениями. В ходе протекания жидкости (по мере продвижения вдоль канала или трубы) размеры этих подобластей изменяются. В каналах и трубах можно указать такие подобласти: одна – примыкающая к границам канала или трубы, и другая, которая не касается границ. Эта последняя подобласть называется ядром течения. Течение ньютоновской жидкости в ядре сформировано течением в области, которая предшествовала рассматриваемым каналу или трубе. Течение в подобласти, примыкающей к границам канала или трубы, иначе называемое пограничным слоем, сформировано рассматриваемыми каналом или трубой. По мере продвижения влияние пограничного слоя рассматриваемого канала или трубы на жидкость увеличивается, а предшествовавшей области уменьшается. Это проявляется в том, что ядро течения уменьшается, а приграничная подобласть увеличивается до тех пор, пока не зай-

мет собой всю область течения. После этого наступает стабилизация потока и устанавливается предельный профиль скорости течения. Приведенная картина равно пригодна как для ламинарных, так и для турбулентных течений. Разбиение потока жидкости на подобласти показано на рис. 2а, б. Область, примыкающая к границам трубы, называется гидродинамическим пограничным слоем. Если этот слой занимает все поперечное сечение канала или трубы, то сила трения на границах определяется профилем скорости всего течения. Если же этот слой занимает не все поперечное сечение канала или трубы, то сила трения на границах определяется профилем скорости только в этом слое.

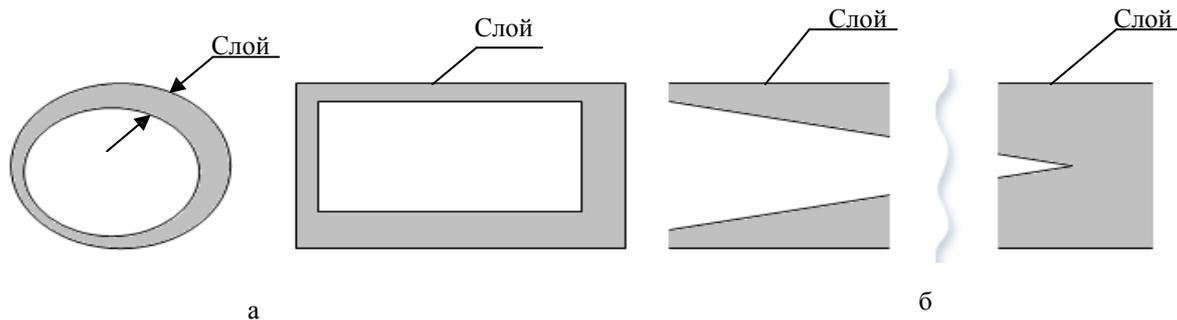


Рисунок 2 – Пограничные слои:
а – поперечное сечение; б – параллельное сечение

Сказанное выше целиком переносится на процесс распространения тепла в движущихся жидкостях в каналах и трубах. С точки зрения распределения температуры в объеме канала или трубы также можно выделить две разные подобласти: подобласть, в которой температура почти постоянна по сечению (ядро потока температуры), и подобласть, в которой температура сильно изменяется от своего значения на границе до значения в ядре. Приграничная подобласть называется тепловым или температурным пограничным слоем. Толщина этого слоя увеличивается от входа в канал или трубу по мере продвижения жидкости. На достаточно большом расстоянии от входа устанавливается предельный или стабилизированный, он же установившийся профиль температуры. Длина, на которой устанавливается такой предельный профиль, называется длиной температурной стабилизации. Толщины гидродинамического и температурного пограничных слоев и соответствующим им длины стабилизации, не совпадают друг с другом по величине [8, 9, 14, 16, 18].

Важное отличие стабилизированной скорости от стабилизированной температуры состоит в том, что профиль стабилизированной скорости остается неизменным при неизменности границ канала или трубы, а профиль стабилизированной температуры самоподобно увеличивается в силу принципа сохранения количества тепла (все, что вошло через границы, должно выйти через поперечное сечение канала или трубы с потоком жидкости).

Из вышеизложенного следует, что определение коэффициентов трения, местных сопротивлений и коэффициентов теплоотдачи как элементов сокращенного описания гидродинамических и тепловых процессов в каналах и трубах основано на таких свойствах, как режим течения (стоксовый, инерционный, турбулентный) и структура потока (разбиение на ядро и пограничные слои).

Все, сказанное выше, относилось к ньютоновской жидкости. Следовательно, для того, чтобы с той же степенью подробности можно было анализировать течения в трубах и каналах неньютоновских жидкостей, необходимо уметь вычислять форму и размеры гидродинамического и температурного пограничных слоев для различных режимов течения и длины стабилизации потоков импульса и температуры. На основании этих данных надо уметь вычислять коэффициенты сопротивления трения, местных сопротивлений и коэффициенты теплоотдачи.

В рамках реализации такой программы рассмотрим реологические модели со следующими связями вязкости и скорости сдвига применительно к продольному чисто сдвиговому течению:

$$\mu(\dot{\epsilon}) = \alpha + \beta \dot{\epsilon} \quad \alpha = \alpha(T), \beta = \beta(T), \quad (1)$$

где μ – вязкость, α и β – коэффициенты, зависящие от температуры и определяемые из эксперимента или справочных данных; $\dot{\epsilon}$ – скорость сдвига продольного течения. Вязкость (1) как линейная функция, представляет собой простейший сплайн, с помощью которого есть возможность аппроксимировать любую гладкую зависимость вязкости μ от $\dot{\epsilon}$. Если течение не является одномерным продольным, то связь вязкости со скоростью сдвига может быть представлена так:

$$\mu(\dot{\epsilon}) = \alpha + \beta \sqrt{I_2}, \quad I_2 = \frac{1}{2} \sum_{i,k} \dot{\epsilon}_{i,k}^2 \quad i, k = x, y, z; \quad (2)$$

$$\dot{\epsilon}_{i,k} = \partial v_i / \partial x_k + \partial v_k / \partial x_i,$$

где x, y, z , – декартовы координаты области течения; v_i – компоненты вектора скорости; I_2 – второй инвариант тензора скорости деформаций [3, 4]. Уравнение Навье-Стокса для $\mu(\dot{\epsilon})$ из (2) записываются в следующем виде:

$$\rho(\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} = -\nabla P + \nabla(\mu(\dot{\epsilon}) \nabla \hat{\epsilon}), \quad \hat{\epsilon} = \|\epsilon_{ik}\|, \quad i, k = x, y, z, \quad (3)$$

где ρ – плотность жидкости; P – давление в жидкости. Плотность ρ может быть, вообще говоря, функцией температуры, однако в области пищевых технологий в силу ограниченности интервала изменения температуры, изменение ρ от T часто бывает незначительным. Выбирая в качестве базовой задачу о течении в плоском канале или трубе для стоксового режима уравнение (3) принимает следующий вид:

$$-\partial P / \partial X + \frac{\partial}{\partial y} \left(\alpha + \beta \frac{\partial v_x}{\partial y} \right) \frac{\partial v_x}{\partial y} = 0; \quad (4)$$

где X – координата вдоль канала или трубы; y – координата поперек. Для этой задачи граничные условия выглядят так:

$$\left. \begin{aligned} v_x(y=0) &= v_0, \\ v_x(y=h) &= v_h \end{aligned} \right\} \text{канал}; \quad \left. \begin{aligned} v_x(y=0) &= 0 \\ v_x(y=h) &= 0 \end{aligned} \right\} \text{труба}, \quad (5)$$

где v_0 и v_h продольные скорости границ канала; h – толщина канала.

В канале границы могут иметь поперечные составляющие скорости v_0 и v_h соответственно. Тогда течение в канале станет двухмерным, а соответствующие уравнения примут такой вид:

$$\begin{aligned} -\partial p / \partial x + \frac{\partial}{\partial y} \{ (\alpha + \beta \sqrt{I_2}) (\partial v_x / \partial y + \partial v_y / \partial x) \}, \\ -\partial p / \partial y + \frac{\partial}{\partial x} \{ (\alpha + \beta \sqrt{I_2}) (\partial v_x / \partial y + \partial v_y / \partial x) \}, \\ \partial v_x / \partial x + \partial v_y / \partial y = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

Уравнение переноса температуры в стоксовом течении имеет обычный вид [13, 16, 17]:

$$\begin{aligned} \rho c_p (v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y}) = \nabla(\lambda \nabla T), \\ \lambda \partial T / \partial n / \Gamma = \alpha_T (T - T^\infty), \end{aligned} \quad (7)$$

где C_p – теплоемкость жидкости; λ – теплопроводность жидкости; α_T – коэффициент теплоотдачи на границе канала или трубы; T^∞ – температура в ядре потока.

Уравнения (6) и (7) связаны между собой через зависимость коэффициентов α и β от температуры и через вхождение компонентов скорости U_x и U_y в (7). Для чисто продольного стоксового течения уравнение (4) можно записать так:

$$-\frac{\partial p}{\partial x} + \alpha \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} + \frac{\partial \alpha}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial y} \frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial \beta}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial y} \left(\frac{\partial v_x}{\partial y} \right)^2 + 2\beta \frac{\partial \partial x}{\partial y} \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} = 0. \quad (8)$$

Для уравнений (4), (6), (7), (8) необходимо найти решения, которые представляют собой стабилизированные решения с нулевой длиной стабилизации. После этого возможно определение коэффициентов трения и теплоотдачи.

Течению бингамовской жидкости отвечает модель вязкости следующего вида [4, 17]:

$$\mu = \gamma(\rho) + \frac{\delta(\rho)}{\sqrt{I_2}}, \quad (9)$$

где $\gamma(\rho)$ выполняет роль, собственно, вязкости, а $\delta(\rho)$ играет роль порогового напряжения сдвига, по достижении которого прекращается вязкое течение.

Тензор напряжений жидкости с такой вязкостью записывается так:

$$\tau_{ik} = \left(\gamma(\rho) + \frac{\delta(\rho)}{\sqrt{I_2}} \right) \varepsilon_{ik}. \quad (10)$$

На тех поверхностях внутри области течения в канале или трубе, где величина I_2 обращается в ноль, жидкость затвердевает, образуя твердое ядро течения. Определение границ и скорости движения ядра представляет собой основную задачу течения бингамовской жидкости.

Уравнение продольного стоксового течения бингамовской жидкости в плоских канале и трубе принимают такой вид:

$$-\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\gamma(\rho) \frac{\partial v_x}{\partial y} + \delta(\rho) \right) = 0 \quad (12)$$

с условиями на границах (5). С учетом зависимости $\gamma(\rho)$ и $\delta(\rho)$ конечные размеры твердого ядра будут зависеть от давления и от продольной координаты x .

Если перейти к ламинарным течениям вне стоксового интервала чисел Рейнольдса, то для стабилизированных течений неньютоновских жидкостей конвективные слагаемые автоматически обратятся в ноль. Это следует из того обстоятельства, что если v_x есть $v_x(y)$, а $v_y \equiv 0$, то форма:

$$v_x \partial v_x / \partial x + v_y \partial v_x / \partial y \equiv 0. \quad (13)$$

Для течений с реологией вида (2) и (9) это условие уже не будет соблюдаться, т.е. для стабилизированных течений следует ожидать зависимости предельных течений от продольной координаты x .

Для нестабилизированных течений необходимо рассматривать уравнения вида (6), (12) или его многомерные аналоги с дополнительными конвективными слагаемыми (13).

Решения уравнений стабилизированного течения требуют задания граничных условий на всех границах области течения (канала или трубы). Решение этих же уравнений, но с конвективными слагаемыми (13) в приближении гидродинамического и температурного пограничного слоев требует задания лишь одного условия на границе канала и трубы. Второе условие следует задавать на неизвестной заранее границе соответствующего пограничного слоя и ядра течения (температурного ядра).

Представленные выше уравнения пригодны для описания стоксовых и инерционных течений, но не турбулентных. Распространение соответствующих задач течения на турбулентные режимы заключается в том, что проводится разложение вектора скорости течения и давления на среднюю и случайную составляющие, после чего каждое слагаемое уравнений течения усредняется. В результате такой процедуры получают уравнения для средних значений и корреляторов мультипликативных величин. Кроме того, к тензору напряжений добавляется дивергенция тензора случайных или пульсационных составляющих такого вида [12, 13, 15]:

$$-\frac{\partial}{\partial x_k} \rho v_k v_i. \quad (14)$$

Известно, что для ньютоновской жидкости турбулентные течения в каналах и трубах достаточно хорошо объясняются с помощью гипотезы Прандтля, согласно которой у границ имеется универсальное распределение профиля скорости, подчиняющееся логарифмическому закону. Область течения турбулентной ньютоновской жидкости может быть разбита на две подобласти – ядро течения и пограничный слой. В отличие от ламинарного течения турбулентный пограничный слой внутри себя содержит вязкий подслой, в котором турбулентность затухает, и течение носит ламинарный характер [12, 13]. Вне этого подслоя расположен собственно турбулентный слой с логарифмическим профилем продольной скорости, который примыкает к ядру течения. На стабилизированном участке ядра течения нет; и все сечение заполнено пограничным слоем, в результате чего устанавливается предельный профиль скорости. На участке стабилизации потока, напротив, имеется уменьшающееся ядро потока и развивающийся пограничный слой.

Данная схема целиком переносится и на неньютоновские течения. Тому есть два подтверждения. Первое состоит в том, что эта схема имеет универсальный характер; и при ее формировании нигде специально не использовалось такое свойство как ньютоновость жидкости. Второе подтверждение состоит в том, что после предельного перехода от неньютоновской реологии к ньютоновской реализуется апробированная схема пристеночной турбулентности Прандтля. Поскольку тензор пульсационных напряжений образован парными корреляторами случайных составляющих вектора скорости после усреднения конвективных слагаемых вида (13) в уравнениях течения, он имеет универсальный характер, не зависящий от выбора той или иной реологической модели и совпадающий с таковым для ньютоновской модели. Это значит, что турбулентность в, собственно, турбулентном пограничном слое для любой модели реологии одна и та же. Отличия возникают в вязком подслое, граница которого доставляет для, собственно, турбулентного пограничного слоя граничное условие. Течение же в вязком подслое для каждой реологической модели свое. Поэтому значения скорости на границе вязкого подслоя и турбулентного слоя для ньютоновской и неньютоновской реологий будут различными. В силу того, что турбулентная вязкость везде, кроме вязкого подслоя, значительно превосходит молекулярную, в, собственно, турбулентном слое профиль продольной скорости тоже будет логарифмическим, т.е. универсальным.

Все сказанное здесь относительно гидродинамического пограничного слоя в турбулентном режиме течения неньютоновских жидкостей переносится на температурный пограничный слой.

Модель инерционного течения в пограничном слое для реологической модели (1) записывается в следующем виде:

$$\rho(v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ (\alpha + \beta \frac{\partial v_x}{\partial y}) \frac{\partial v_x}{\partial y} \right\}; \quad (15)$$

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y / \partial y = 0;$$

$$v_x(y = 0) = 0;$$

$$v_x(y = \delta_v) = U^\infty, \quad (16)$$

где δ – означает толщину гидродинамического ламинарного пограничного слоя; U^∞ – значение продольной скорости в ядре потока.

Модель ламинарного течения в пограничном слое для реологической модели (12) может быть записана в следующем виде:

$$\begin{aligned} \rho(v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y}) &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \gamma(\rho) \frac{\partial v_x}{\partial y} + \delta(\rho) \right\}; \\ \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} &= 0; \\ v_x(y=0) &= 0; \\ v_x(y=\delta_v) &= U^\infty \end{aligned} \quad (17)$$

Модель переноса температуры в ламинарном температурном пограничном слое имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} \rho c_p (v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y}) &= \frac{\partial}{\partial y} (\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial y}); \\ T(y=0) &= T_0, \\ T(y=\delta_T) &= T^\infty \end{aligned} \quad (18)$$

где T_0 – значение температуры на границе канала или трубы; T^∞ – значение температуры в ядре потока; δ_T – означает толщину температурного ламинарного пограничного слоя.

Модель турбулентного течения в гидродинамическом пограничном слое для реологии (1) может быть представлена следующим образом:

$$\begin{aligned} \rho(v_x \frac{\partial \overline{v_x}}{\partial x} + v_y \frac{\partial \overline{v_x}}{\partial y}) &= -\frac{\partial \overline{p}}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} (\overline{\alpha} + \overline{\beta} \frac{\partial \overline{v_x}}{\partial y}) \frac{\partial \overline{v_x}}{\partial y} + \overline{\alpha'} \frac{\partial \overline{v_x}}{\partial y} + \frac{\overline{\alpha' \partial v_x'}}{\partial y} + \overline{\beta} (\frac{\partial \overline{v_x}}{\partial y})^2 + \\ &\quad \overline{\beta'} (\frac{\partial \overline{v_x}}{\partial y})^2 + \overline{\beta'} (\frac{\partial v_x'}{\partial y})^2 - \frac{\partial}{\partial y} \overline{\rho v_x'^2} \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \overline{v_x}(y=0) &= 0; \\ \overline{v_x}(y=\delta_v^t) &= v^{\infty t}, \end{aligned} \quad (20)$$

где знак « $\overline{\quad}$ » означает операцию усреднения величины, над которой он стоит; знак « \prime » означает случайную составляющую величины; δ_v^t – означает толщину турбулентного слоя; $v^{\infty t}$ означает величину скорости в ядре турбулентного потока.

Модель турбулентного течения в пограничном слое для реологической модели (12) выглядит следующим образом:

$$\rho(\overline{v_x} \frac{\partial \overline{v_x}}{\partial x} + \overline{v_y} \frac{\partial \overline{v_x}}{\partial y}) = -\frac{\partial \overline{P}}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} (\overline{\gamma} \frac{\partial \overline{v_x}}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial y} \overline{\gamma' \frac{\partial v_x'}{\partial y}} + \frac{\partial \overline{\delta}}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial y} \overline{\rho v' \chi^2}; \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \overline{v_x}(y=0) &= 0; \\ \overline{v_x}(y=\delta_v^t) &= U^\infty. \end{aligned} \quad (22)$$

Уравнения (21) и (19), для конкретности, записаны так потому, что сделано допущение о том, что функции $\lambda, \beta, \gamma, \delta$ могут быть представлены в виде суммы постоянной и случайной составляющих. Это верно, если эти функции можно представить как линейно зависящие от температуры и давления. В противном случае такое расщепление и такой конкретный вид уравнений невозможен.

Модель турбулентного переноса температуры в пограничном температурном слое записывается так:

$$\rho c_p (\overline{v_x} \frac{\partial \overline{T}}{\partial x} + \overline{v_y} \frac{\partial \overline{T}}{\partial y}) = \frac{\partial}{\partial y} (\overline{\lambda} \frac{\partial \overline{T}}{\partial y}) - \frac{\partial}{\partial y} (\rho c_p \overline{v_x'} \frac{\partial \overline{T}}{\partial y}); \quad (23)$$

$$\begin{aligned} \overline{T}(y=0) &= T_0, \\ \overline{T}(y=\delta_T^t) &= T^{\infty t}, \end{aligned} \quad (24)$$

где $T^{\infty t}$ – означает температуру в ядре потока; δ_T^t – означает толщину температурного турбулентного пограничного слоя.

Для разрешимости уравнений турбулентного течения в ядре потока и в пограничном слое необходимо установить связь между средними и случайными составляющими для скорости течения и температуры. Исходя из сказанного выше, следует на основании гипотезы Прандтля ввести длины перемешивания l_v и l_T для скорости и температуры соответственно, по правилу [12, 13, 15].

$$v_x' / \overline{\partial v_x' / \partial y} = l_v; \quad T' / \overline{\partial T' / \partial y} = l_T. \quad (25)$$

Выводы. Реализация изложенной методики позволила бы вычислить коэффициенты сопротивления трения и коэффициенты теплоотдачи для стабилизированных и нестабилизированных течений неньютоновских жидкостей рассмотренных моделей во всем диапазоне изменения числа Рейнольдса. Для вычисления местных сопротивлений требуется знание полей скорости, и температуры во всем объеме канала и трубы. Соответствующая модель составит предмет следующей публикации.

Литература

1. Лукин, Д.Г. Теплообменные аппараты пищевых производств [Текст] / Д.Г. Лукин, В.Н. Вельтишев. – М.: Агропромиздат, 1987. – 239 с.
2. Кузнецов, О.А. Реология пищевых масс [Текст]: учеб. пособие / О.А. Кузнецов, Е.В. Волошин, Р.Ф. Сагитов. – Оренбург, 2005. – 234 с.
3. Райнер, М. Реология [Текст] / М. Райнер. – М.: Наука. ГРФМЛ, 1965. – 223 с.

4. Фрейденталь, А. Математические теории неупругой сплошной сферы [Текст] / А. Фрейденталь, Х. Гейрингер. – М.: ГИФМЛ, 1962. – 432 с.
5. Уилкинсон, У.Л. Неньютоновские жидкости [Текст] / У.Л. Уилкинсон. – М.: Мир, – 1964. – 216 с.
6. Гиргидов, А.Д. Механика жидкости и газа (гидравлика) [Текст] / А.Д. Гиргидов. – Спб.: Изд-во СпбПУ, 2007. – 545 с.
7. Идельчик, И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям [Текст] / И.Е. Идельчик. – М.: Машиностроение, 1975. – 653 с.
8. Кутателадзе, С.С. Анализ подобия в теплофизике [Текст] / С.С. Кутателадзе. – Новосибирск: Наука. Сиб. отд., 1982. – 280 с.
9. Кутателадзе, С.С. Теплоотдача и гидродинамическое сопротивление [Текст] / С.С. Кутателадзе. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 336 с.
10. Гогос, К. Теоретические основы переработки полимеров [Текст] / К. Гогос, З. Тармор. – И.: Химия, 1984. – 628 с.
11. Берхардт, Э. Переработка термопластичных материалов [Текст] / Э Берхардт. – М.: Химия, 1965. – 746 с.
12. Ландау, Л.Д. Теоретическая физика [Текст]. Т. VI. Гидродинамика / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – 3-е изд. – М.: Наука. ГРФМЛ, 1986. – 736 с.
13. Торнер, Р.В. Теоретические основы переработки полимеров [Текст] / Р.В. Торнер. – М.: Химия, 1967. – 462 с.
14. Кутателадзе, С.С. Основы теории теплообмена [Текст] / С.С. Кутателадзе. – 8 изд. – М.: Наука. ГРФМЛ, 1979. – 415 с.
15. Турбулентность. Принципы и применения [Текст] / под ред. У. Фроста, Т. Моулдена. – М.: Мир., 1980. – 535 с.
16. Тарг, С.М. Основные задачи теории ламинарных течений [Текст] / С.М. Тарг. – М.-Л.: ГИТТЛ, 1951. – 420 с.
17. Лойцянский, Л. Г. Механика жидкости и газа [Текст] / Л. Г. Лойцянский. – 4-е изд. – М.: Наука. ГРФМЛ, 1973. – 847 с.
18. Лойцянский Л. Г. Ламинарный пограничный слой [Текст] / Л. Г. Лойцянский. – М.: ГИФМЛ, 1962. – 479 с.

Bibliography (transliterated)

1. Lukin, D.G. Teploobmennye apparaty pishhevyh proizvodstv [Tekst] D.G. Lukin, V.N. Vel'tishhev. – М.: Agropromizdat, 1987. – 239 p.
2. Kuznecov, O.A. Reologija pishhevyh mass [Tekst]: ucheb. posobie O.A. Kuznecov, E.V. Voloshin, R.F. Sagitov. – Orenburg, 2005. – 234 p.
3. Rajner, M. Reologija [Tekst] M. Rajner. – М.: Nauka. GRFML, 1965. – 223 p.
4. Frejidental', A. Matematicheskie teorii neuprugoj sploshnoj sfery [Tekst] A. Frejidental', H. Gejringer. – М.: GIFML, 1962. – 432 p.
5. Uilkinson, U.L. Nen'jutonovskie zhidkosti [Tekst] U.L. Uilkinson. – М.: Mir, – 1964. – 216 p.
6. Girgidov, A.D. Mehanika zhidkosti i gaza (gidravlika) [Tekst] A.D. Girgidov. – Spb.: Izd-vo SpbPU, 2007. – 545 p.
7. Idel'chik, I.E. Spravochnik po gidravlicheskim soprotivlenijam [Tekst] I.E. Idel'chik. – М.: Mashinostroenie, 1975. – 653 p.
8. Kutateladze, S.S. Analiz podobija v teplofizike [Tekst] / S.S. Kutateladze. – Novosibirsk: Nauka. Sib. otd., 1982. – 280 p.

9. Kutateladze, S.S. Teplootdacha i gidrodinamicheskoe soprotivlenie [Tekst] S.S. Kutateladze. – M.: Jenergoatomizdat, 1990. – 336 p.
10. Gogos, K. Teoreticheskie osnovy pererabotki polimerov [Tekst] K. Gogos, Z. Tarmor. – I.: Himija, 1984. – 628 p.
11. Berhardt, Je. Pererabotka termoplastichnyh materialov [Tekst] Je Berhardt. – M.: Himija, 1965. – 746 p.
12. Landau, L.D. Teoreticheskaja fizika [Tekst]. T. VI. Hidrodinamika L.D. Landau, E.M. Lifshic. – 3-e izd. – M.: Nauka. GRFML, 1986. – 736 p.
13. Torner, R.V. Teoreticheskie osnovy pererabotki polimerov [Tekst] R.V. Torner. – M.: Himija, 1967. – 462 p.
14. Kutateladze, S.S. Osnovy teorii teploobmena [Tekst] / S.S. Kutateladze. – 8 izd. – M.: Nauka. GRFML, 1979. – 415 p.
15. Turbulentnost'. Principy i primeneniya [Tekst] / pod red. U. Frosta, T. Mouldena. – M.: Mir., 1980. – 535 p.
16. Targ, S.M. Osnovnye zadachi teorii laminarnykh techenij [Tekst] S.M. Targ. – M.-L.: GITTL, 1951. – 420 p.
17. Lojczanskij, L. G. Mehanika zhidkosti i gaza [Tekst] / L. G. Lojczanskij. – 4-e izd. – M.: Nauka. GRFML, 1973. – 847 p.
18. Lojczanskij L. G. Laminarnyj pograničnyj sloj [Tekst] / L. G. Lojczanskij. – M.: GIFML, 1962. – 479 p.

УДК 532.135; 532.5

Білецький Е.В., Толчинський Ю.А.

ЩОДО ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТІВ ТЕРТЯ ТА ТЕПЛОВІДАЧІ ДЛЯ ДЕЯКИХ МОДЕЛЕЙ НЕНЬЮТОНІВСЬКИХ РІДИН

В статті розглядається програма обчислень гідравлічних коефіцієнтів для різних моделей степінної й бінгамовської рідини за умов течії в трубах та каналах.

Beletsky E.V., Tolchinskiy Y.A.

ABOUT THE DETERMINATION OF FRICTION AND HEAT TRANSFER COEFFICIENTS FOR SOME MODELS OF NON-NEWTONIAN FLUIDS

The article deals with the program of calculating hydraulic factors for various models of exponential and Bingano fluids in pipes and channels.

УДК 621.165

Анипко О.Б., Новиков А.И., Савченко В.А.

**ОСНОВНЫЕ ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ОБРАЗОВАНИЕ ОТЛОЖЕНИЙ
И СПОСОБЫ БОРЬБЫ С ЗАГРЯЗНЕНИЯМИ ТЕПЛООБМЕННОЙ
ПОВЕРХНОСТИ ПЛАСТИНЧАТОГО ТЕПЛООБМЕННОГО АППАРАТА**

АО «Содружество–Т», Украинский морской институт

Актуальность работы. Одной из основных причин снижения интенсивности теплообмена является отложение на теплопередающей поверхности теплообменника различного рода загрязнений, которые оказывают дополнительное сопротивление теплопередаче.

К какой бы конструкции не относился теплообменный аппарат, он обладает вполне определёнными статическими характеристиками, которые с достаточной степенью точности рассчитываются на основе хорошо разработанных и многократно апробированных методов теории теплопередачи.

Существует подход, в соответствии с которым большинство типов энергетических, технологических и транспортных ТА характеризуются относительно медленным протеканием процесса теплообмена, работают в мало изменяющихся условиях, практически при постоянных нагрузках. Поэтому для таких аппаратов не возникает проблема динамики. Однако, если под динамикой процесса понимать изменение во времени выходных параметров под влиянием каких-либо факторов, то перечисленные группы ТА следует отнести к динамическим объектам, а одним из существенных факторов, влияющим на его тепло-гидравлические характеристики – изменяющееся во времени термическое сопротивление слоя отложений на теплопередающей поверхности. Причём, влияние этого фактора может быть настолько существенным, что сводит «на нет» преимущества самых высокоэффективных теплообменников.

При выборе ТА оценка термического сопротивления возможных загрязнений имеет существенное значение, поскольку именно термическое сопротивление теплопередачи определяет эффективность теплообменного аппарата. Существует практика [1, 7, 13], когда с целью компенсации термического сопротивления возникающих загрязнений расчётную поверхность увеличивают на 10...15 %, а иногда и до 50 %. Это влечёт за собой выпуск дополнительной поверхности теплообмена, материалом которой, как правило, являются алюминий, медь, легированные стали. Кроме того, увеличение поверхности неизбежно ведёт к росту мощности на прокачивание теплоносителей, стоимости теплообменников, что отражается на себестоимости выпускаемой продукции и увеличению сроков окупаемости нового теплообменного оборудования.

Обзор и анализ ряда работ показывает, что к основным последствиям, к которым приводят отложения, следует отнести:

1. Изменение коэффициента теплопередачи K .
2. Изменение площади проходного сечения для потока теплоносителя.
3. Изменение геометрической формы каналов ввиду неравномерности отложений по длине и периметру.
4. Изменение шероховатости поверхности.
5. Изменение гидравлического сопротивления (как следствие п. 2, 3, 4).

Следует отметить, что в общем случае толщина загрязнений ($\delta_{загр}$) и теплопроводность ($\lambda_{загр}$) меняются со временем. В большинстве работ приводятся данные о термическом сопротивлении теплопередаче различных отложений без указания на то, через какое время работы ТА получены эти значения, хотя именно время достижения предельного допустимого значения термического сопротивления загрязнений и определяет периодичность обслуживания.

Таким образом, в общем случае полагая, что $\lambda_{загр} = \text{const}$ можно записать

$$\mathfrak{R}_{загр} = f(\bar{\tau}) = \frac{\delta_{загр}(\bar{\tau})}{\lambda}. \quad (1)$$

Учитывая это, коэффициент теплопередачи K также является функцией времени:

$$K(\bar{\tau}) = \frac{1}{\frac{1}{\lambda_1} + \left(\frac{\delta_{загр}(\bar{\tau})}{\lambda_{загр}}\right)_1 + \frac{\delta_{см}}{\lambda_{см}} + \frac{1}{\lambda_2} + \left(\frac{\delta_{загр}(\bar{\tau})}{\lambda_{загр}}\right)_2} = \frac{1}{\frac{1}{\lambda_1} + \frac{\delta_{см}}{\lambda_{см}} + \frac{1}{\lambda_2} + \mathfrak{R}_{загр}^{\Sigma}(\bar{\tau})}, \quad (2)$$

где индексы 1 и 2 относятся к греющему и нагреваемому теплоносителю соответственно, а $\mathfrak{R}_{загр}^{\Sigma}(\bar{\tau})$ – суммарное термическое сопротивление загрязнений с обеих сторон теплопередающей поверхности.

Строго говоря, в выражении (2) только термическое сопротивление степени $\left(\frac{\delta_{см}}{\lambda_{см}}\right)$ будет оставаться постоянным, поскольку коэффициенты теплоотдачи α_1 α_2 также будут изменяться в виду последствий отложений, указанных в пунктах 2, 3, и 4. Однако, в доступных источниках и обзорных работах данные о величине изменения коэффициента теплоотдачи в результате уменьшения проходного сечения канала, изменения его формы и шероховатости стенок не приводится.

Можно предположить, что при отсутствии ограничений на мощность, затрачиваемую на прокачивание теплоносителя, увеличение скорости потока может приводить к повышению α , что может частично компенсировать снижение K из-за термического сопротивления отложений.

Следует отметить, что повышение скорости теплоносителя ограничивается вибрацией, шумом и мощностью, затрачиваемой на прокачивание теплоносителя. Если предположить, что расход теплоносителя остаётся неизменным ($G = \text{const}$) и при условии, что проходное сечение (S) уменьшается в процессе эксплуатации, то скорость потока должна возрасти. Дальнейшее повышение скорости связано с дополнительной мощностью на прокачивание теплоносителя, что не всегда оправдано.

Таким образом, в работающем ТА

$$G = S(\bar{\tau}) \cdot W(\bar{\tau}). \quad (3)$$

Во многих публикациях приводятся впечатляющие фотографии отложений на поверхностях [1–6]. Обобщённый процесс изменения геометрической формы гофрированного канала может быть представлена следующим образом (рис. 1).

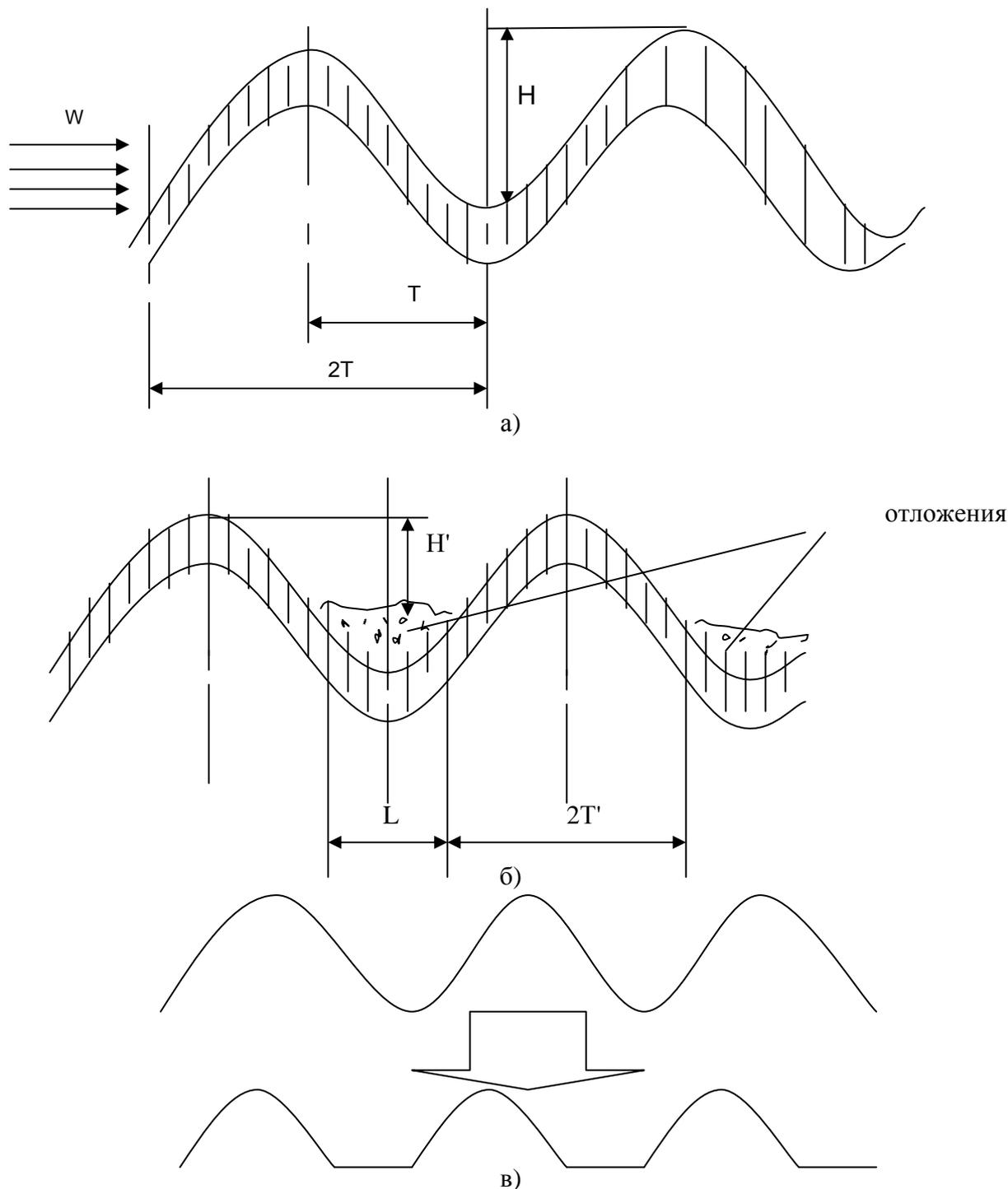


Рисунок 1

а) – чистая гофрированная поверхность; б) та же поверхность с отложениями; в) схема трансформации геометрической формы поверхности в результате образования отложений

Чистая поверхность (рис. 1а) характеризуется высотой гофра H и их шагом $2T$. В процессе эксплуатации впадины в большей степени подвержены образованию отложений, что обусловлено структурой потока вдоль гофрированной поверхности. Вершины выступов, где имеет место отрыв потока, длительное время остаются в меньшей степени загрязнёнными. Наконец заполнение впадин становится настолько существенным, что между гофрами образуется довольно протяжённая площадка длиной L (рис. 1.б) таким образом, поверхность, по своему профилю из гофрированной становится плоским каналом с выступами. Такая новая поверхность характеризуется другими геометрическими параметрами: L – расстояние между выступами; H' и $2T'$ – соответственно высота и длина выступов. Анализ доступных данных о теплопередаче таких поверхностей показывает [3], что при $Re = (3/10) \cdot 10^4$ теплоотдача гофрированной поверхности пропорциональна $Re^{0.5}$, а поверхности с выступами – $Re^{0.8}$ [2]. Причём существенно неравномерными вдоль поверхности становятся значения местного коэффициента теплоотдачи и, как следствие, возрастают перетоки теплоты в гофрированной стенке. Кроме этого шероховатость участков с отложениями отличается от шероховатости незагрязнённой поверхности.

Шероховатость определяет коэффициент сопротивления. Если она меняется в процессе работы ТА, то, в конечном счёте, меняется и потребная мощность на прокачивание теплоносителя, что приводит к отклонению значения фактической скорости теплоносителя в ТА от расчётного.

Таким образом, отклонения приводят к ряду последствий, которые в совокупности изменяют теплогидравлические характеристики работающего ТА. Ряд факторов, таких как изменение шероховатости поверхности, геометрической формы, влияние изменения скорости представляются малоизученными в ходе эксплуатации. В основном влияние загрязнений учитывают в виде дополнительного термического сопротивления, значение которого постоянно и выбирается на основе нормативных рекомендаций, которые носят отрывочный, селективный характер, часто в виде прогноза [4], а в отдельных случаях носят противоречивый характер.

В настоящее время в промышленности, энергетике и на транспорте применяется большое количество типов рекуперативных ТА с различными теплоносителями. Поэтому целесообразно разработать классификацию ТА, отражающую специфические условия образования загрязнений (рис. 2).

Проблема отложений на теплопередающих поверхностях рекуперативных теплообменников не нова. Наряду с периодическими очистками различными исследователями предлагалось увеличивать скорость теплоносителя, увеличивать расчётную поверхность [1], вводить добавки в теплоноситель, резко менять температурный режим. Однако, до настоящего времени универсального предотвращения образования отложений не разработано. По-видимому, он и не может быть разработан в виду ряда объективных причин, к которым следует отнести:

- невозможность использования «чистого» теплоносителя, т.е. не содержащего примесей, образующих отложения;
- изменение температуры поверхности ТА, а именно, её нагрев, что увеличивает химическую активность конструкционных материалов;
- микро- и макро- электромагнитные процессы в пограничном слое теплоносителя и тонком поверхностном слое теплообменной поверхности.

Таким образом, перечисленные способы «предотвращения» загрязнений, в лучшем случае, являются решениями частных задач для конкретных условий. Так, увеличение скорости теплоносителя ведёт к росту гидравлического сопротивления, а, следовательно, и мощности на прокачивание теплоносителя.

Увеличение поверхности для компенсации возрастающего термического сопротивления также нельзя признать вполне оправданным, поскольку, во-первых – дополнительная поверхность также загрязняется; во-вторых – увеличивается стоимость ТА, и, наконец, в-третьих – увеличивается гидравлическое сопротивление.

К теплоносителям, применяемым в энергетических, транспортных, технологических ТА, предъявляется ряд требований по их теплофизическим, химическим и эксплуатационным свойствам [5]. Так, теплоносители, имеющие большие плотность и теплоёмкость, позволяют отводить теплоту при сравнительно небольших перепадах температуры между входом и выходом в ТА при одинаковых объёмных расходах теплоносителя. В тоже время повышенная плотность приводит к необходимости затрачивать большую мощность на привод насосов, при прочих равных условиях. Высокая теплопроводность теплоносителя положительно сказывается на теплоотдачу, поскольку снижает термическое сопротивление в пограничном слое.

Важной характеристикой является температура кипения теплоносителя. Следует стремиться к тому, чтобы теплоноситель имел сравнительно высокую температуру кипения при невысоком давлении насыщающих паров. Такое соотношение позволяет создавать ТА, в которых теплоноситель остаётся в жидком состоянии без повышения давления. В свою очередь низкое давление позволяет уменьшать массу конструкции и использовать обычные материалы без риска разрушения теплообменника.

С точки зрения выбора материала ТА другим важнейшим фактором являются химические свойства теплоносителя. Необходимо, чтобы теплоноситель был химически стойким, не способствовал коррозии и эрозии материала, не образовывал взрывчатые смеси, как например, жидкие щелочные металлы с водой. Алюминий с водой также даёт экзотермическую реакцию при определённых температурах. Перечисленные факторы существенно влияют также и на свойства и структуру отложений.

Так, повышение температуры приводит к спеканию отложений в пристенном слое. Различные примеси в теплоносителе, вступая в реакцию между собой и с материалом ТА могут увеличивать количество отложений и интенсивность их образования. Эрозия повышает шероховатость поверхности, создавая благоприятные условия для сцепления отложений с поверхностью.

Таким образом, свойства теплоносителя существенно влияют на интенсивность отложений на теплообменной поверхности. Так для судовых теплообменников наиболее проблематичным теплоносителем является морская вода, солёность которой колеблется в пределах от 6–8 до 40 % и в которой содержатся биологические компоненты.

Отложения образуются при работе теплообменников на различных теплоносителях, с любой стороны, как на гладких, так и на развитых поверхностях. Так на наружных поверхностях теплообменников транспортных машин наблюдается отложение пыли, масел, продуктов сгорания топлива [10]. Теплообменники-испарители холодильных установок со стороны воздуха характеризуются инееобразованием, что также снижает коэффициент теплопередачи.

Однако, несмотря на разнообразие условий работы ТА и теплоносителей, большинство исследователей сходно оценивают структуру слоя отложений. Он подразделяется на три характерных слоя – верхний, средний и нижний. Верхний слой состоит из частиц слабо связанных между собой. В среднем слое идёт процесс кристаллизации. Нижний – в большинстве случаев представляет собой кристаллическое образование. В работе [6] отмечается, что когда в теплоносителе преобладает одна соль, то, как правило, образуются твёрдые отложения – так называемая накипь – отдельные частицы которой прочно связаны между собой и теплообменной поверхностью. Если теплоноси-

тель содержит большое количество солей, то при их отложении между группами кристаллов разных солей могут образовываться пустоты, где оседают суспензированные частицы, уменьшающие прочность отложений.

Обширный материал о свойствах отложений приводится в [1], однако, практическое применение этих данных представляется довольно ограниченным, поскольку они приведены для слоя толщиной $\delta_3 = 5$ мм, а температура теплоносителя не превышает 200°C .

Основным недостатком данных [1] является отсутствие информации о времени работы ТА, необходимом для образования слоя загрязнений толщиной $\delta_3 = 5$ мм, или другого размера.

В работах [3, 4] отмечается, что толщина и свойства слоя загрязнений являются функцией изменяющихся параметров – времени, скорости теплоносителя, температуры, плотности теплового потока и концентрации примесей в теплоносителе.

Таким образом, набор функций перечисленных параметров от времени работы ТА в своей совокупности определяют изменение теплопередачи в процессе эксплуатации теплообменника.

В более поздних публикациях [7] приводится интересная классификация типов загрязнений, а именно – грубые, крупнодисперсные частицы (*carse fouling*), и поверхностные отложения. Причём, считают, что первые в основном влияют на гидравлическое сопротивление и практически не снижают теплопередачи.

В свою очередь поверхностные загрязнения подразделяют на накипь ($\lambda \approx 2 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}}$), биоотложения ($\lambda \approx 0,57 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}}$) и осадок ($\lambda \approx 1,14 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}}$) (или заиливание), образованию которого способствуют крупнодисперсные частицы.

Однако и в этой работе в качестве мероприятия по борьбе со снижением теплопередачи в результате отложений рекомендуется увеличение поверхности теплообмена, которое для $K \approx 2500 \frac{\text{кВт}}{\text{м}^2\text{К}}$ при термическом сопротивлении отложений $\sim 4 \cdot 10^{-4} \frac{\text{м}^2\text{К}}{\text{Вт}}$, может достигать 100 %.

Данные работ [1,2,7,10,17,21] позволяют сделать вывод о том, что термическое сопротивление отложений колеблется в пределах $(1 \dots 8) \cdot 10^{-4} \frac{\text{м}^2\text{К}}{\text{Вт}}$ для 1200 часов работы, в зависимости от условий эксплуатации, однако ни модели отложений, ни анализ эксплуатационных факторов не приводился.

Одним из путей борьбы с отложениями является подготовка теплоносителя к эксплуатации. Вода, являясь одним из самых распространённых теплоносителей, содержит примеси солей, способствующие отложениям. Однако, несмотря на предварительную подготовку воды в системах отопления и горячего водоснабжения, как отмечается в [8], поверхности ПТА загрязняются. Кроме того, химический состав воды в различных регионах существенно отличается, что влияет на эксплуатационные характеристики теплообменников.

Обзор и анализ работ [3, 6, 7, 8, 9] выявил и общее мнение – а именно – высокую технологичность, надёжность и удобство обслуживания ПТА при очистке теплообменных поверхностей.

Важным фактором, влияющим на изменение теплопередачи в результате отложений, является конструкция аппарата и геометрическая форма поверхности теплообмена [2, 9,27]. Так, согласно [9] в наибольшей степени подвержены загрязнению (в по-

рядке убывания) рубашки охлаждения, пластинчатые теплообменники и трубчатые поверхности, а в меньшей степени – оребрѐнные каналы и спиральные ТА. Причѐм отмечается, что поверхности с низкими рѐбрами способны к «самоочищению» ввиду отслоения отложений в результате температурных перепадов в ребре и несущей поверхности. В доступных источниках данных о сравнительном загрязнении пластин с S-образными и треугольными гофрами не обнаружено, равно, как и влияние соотношений размеров пластины и гофра.

Проблема отложений для пластинчатых теплообменников решается проще, чем для большинства других аппаратов [8, 6]. Высокая степень турбулизации потока между пластинами при сравнительно малых числах Рейнольдса, сводит к минимуму образование большинства разновидностей отложений. Конструкция аппарата позволяет производить очистку поверхности непосредственно на месте. Если необходима очистка вручную, то этот тип теплообменника может быть легко разобран, очищен и собран. Данные, опубликованные Ассоциацией фирм-изготовителей трубчатых теплообменников [12], позволяют сделать вывод о том, что термическое сопротивление отложений вдвое меньше, чем в трубчатых аппаратах.

Использовать данные по отложениям в трубчатых аппаратах не представляется целесообразным, поскольку коэффициенты теплоотдачи в пластинчатых аппаратах намного выше. Однако при отсутствии данных при разработке пластинчатых теплообменников рекомендуется [1, 13, 22] использовать значения термических сопротивлений, не превышающие 1/5 значений для трубчатых аппаратов.

По аналогии с процессами кристаллизации толщина слоя и масса загрязнений могут быть определены следующим образом:

$$\rho_3 F \frac{d\delta_3}{d\tau} = \frac{dm}{d\tau} \quad (4)$$

Изменение массы компонента загрязнений

$$\frac{dm}{d\tau} = \beta F (\Delta c)^4 \quad (5)$$

При допущении линейного изменения концентрации загрязнений для интервала температур жидкости ($t_{ж}$) и загрязнений (t_3) изменение концентрации

$$\Delta c = \epsilon (t_3 - t_{ж}) \quad (6)$$

С учётом (5) и (6) перепишем (4) относительно скорости образования загрязнений ($\frac{d\delta_3}{d\tau}$)

$$\frac{d\delta_3}{d\tau} = \frac{p}{\rho_3} \epsilon^4 (t_3 - t_{ж})^4 \quad (7)$$

Как видно из (7), скорость роста толщины загрязнений пропорциональна температурному напору ($t_3 - t_{ж}$) и коэффициенту массоотдачи. Это выражение также показывает, что чем меньше плотность отложений, тем меньше скорость роста их толщины.

В выражении (7), строго говоря, β также является функцией скорости среды и температуры, что затрудняет практическое его использование.

Скорость образования слоя загрязнений по данным [14,12] может быть представлена как разность факторов отложения ($\overline{\Phi}_m$) и уноса ($\overline{\Phi}_y$):

$$\frac{d\delta_3}{d\tau} = \overline{\Phi}_m - \overline{\Phi}_y. \quad (8)$$

По той же причине (8) также носит скорее теоретический характер, поскольку данных о $\overline{\Phi}_m$ и $\overline{\Phi}_y$ нет.

Экспериментальные данные [16] показывают, что слой отложений, который образовался при низких скоростях потока, может быть размыт и удалён кратковременным повышением скорости. Аналогичный подход, только путём повышения температуры, упоминается в [3]. Таким образом, существуют воздействия подавляющие рост слоя загрязнений.

Ввиду сложностей, возникающих при теоретических исследованиях, экспериментальные данные аппроксимируют простым асимптотическим соотношением [26]

$$\frac{R_3}{R_3^*} = 1 - e^{-Bz}. \quad (9)$$

Такая аппроксимация представляется вполне приемлемой для практических расчётов, однако и (9) не лишено недостатков. Во-первых, – низкая точность в начальной стадии процесса образования загрязнений. Во-вторых, – трудности и условность определения максимально допустимого термического сопротивления загрязнений.

В подавляющем большинстве работ толщина слоя загрязнений анализируется на основе уравнения теплопередачи

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{K_0} + R_3, \quad (10)$$

где K и K_0 – коэффициент теплопередачи для загрязнённой и чистой поверхности теплообмена соответственно.

В целом, анализ работ за последние сорок лет [1, 3, 4, 6, 7, 9, 10, 14, 21, 22,] показывает, что теплоносители с относительно разными плотностью и теплопроводностью компонентов имеют большую скорость образования отложений; относительно высокий температурный напор приводит к сравнительно быстрому снижению коэффициента теплопередачи; увеличение скорости потока приводит к росту теплоотдачи и некоторому снижению скорости образования отложений, при этом наблюдается существенный рост гидравлического сопротивления.

Таким образом, можно заключить, что расчёт и выбор теплообменного аппарата осуществляется для чистой поверхности, величина которой увеличивается по сравнению с расчётными значениями на 10–15, а иногда и до 50 % с целью компенсации снижения коэффициента теплопередачи в результате отложений.

Уменьшение тепловой нагрузки теплообменника после некоторого периода работы обусловлено тем, что часть температурного напора затрачивается на преодоление термического сопротивления загрязнений поверхности.

Перепад температур в слое отложений пропорционален термическому сопротивлению слоя, что не несёт никакой информации о времени работы ТА, поскольку пе-

репад температур в равной степени зависит и от теплового потока ($\Delta t_3 = qR_3$). Тепловые потоки в процессе эксплуатации могут принимать различные значения. Поэтому, имея одно расчётное значение теплового потока, использование сопротивления слоя загрязнений практически не имеет большого смысла.

Повышение скорости потока, как способ борьбы с отложениями приводит к росту потерь давления, а повышение температуры не всегда достигает эффекта очистки. При этом твёрдые загрязнения не чувствительны к тепловым расширениям. Живое сечение уменьшается, скорость возрастает и, наряду с ростом гидравлического сопротивления до некоторого значения возрастает теплоотдача. Здесь возникают задачи определения времени работы ТА, когда рост теплоотдачи компенсирует влияние отложений, и определения допустимого значения гидравлического сопротивления. Так при уменьшении живого сечения в 1,7 раз потери давления увеличиваются в 2,5–3 раза.

Пластинчатые теплообменные аппараты конструктивно наиболее приспособлены для очистки поверхности и за счёт турбулизации потока при относительно малых числах Re имеют преимущества по устойчивости отложений по сравнению с широко распространёнными трубчатыми ТА. Однако, до настоящего времени отсутствуют зависимости толщины слоя отложений даже, для воды, от скорости потока и времени эксплуатации ТА.

Для отдельных теплоносителей способность образовывать отложения настолько существенна, что может «свести на нет» достоинства самых эффективных поверхностей.

Выводы. Учитывая вышеизложенное, необходима разработка мероприятий по поддержанию околорасчетного значения теплопередачи работающего пластинчатого теплообменника на основе выявления закономерностей изменения термического сопротивления слоя отложений от времени, скорости и типа теплоносителя.

Литература

1. РТМ 26-01-36-70.
2. Пучков П.И., Виноградов О.С. Исследование теплоотдачи и гидравлических сопротивлений каналов с теплоотдающей внутренней поверхностью // Теплоэнергетика, 1964. №10. С. 62–65.
3. Анипко О.Б. Рациональные теплообменные поверхности. Харьков: ХВУ., 1998. 197 с.
4. Шицман М.Е., Егоров Э.Д. О динамике роста отложений солей в интенсивно обогреваемых трубах НРЧ котла СНД блока 300 МВт // Теплоэнергетика. 1969. №4 с. 10–14.
5. Кошкин В.К., Калинин Э.К. Теплообменные аппараты и теплоносители. М. Машиностроение. 1971.
6. Анипко Б.В. Проблема загрязнения теплообменных устройств и прогнозная оценка их термического сопротивления теплопередаче. Препринт ИПМаш АН УССР. Харьков, 1987 г.
7. Ladislav Novak/ Fouling of compact heat exchangers. Alfa-laval/www.alfalaval.com.2004.
8. Пластинчатые теплообменники Альфа – Лаваль – гарантия успеха ваших проектов. АВОК №11, 1996 г.
9. H. Müller – Steinhagen, M.R. Malayeri, A.P. Watkinson Fouling of Heat Exchangers – New Approaches to solve an Old-problem // Heat transfer engineering Vol. 26. №1, 2005. p. 1–4.

10. Бурков В.В., Индейкин А.И. Автотракторные радиаторы. Л.: Машиностроение, 1978.
11. Маньковский О.Н., Толчинский А.Р., Александров М.В. Теплообменная аппаратура химических производств. Л.: Химия, 1976.
12. Reitzer V. Rate of Scale Formation in Tubular Heat Exchangers. Ind Eng Chem. Proc. Das. And Der. 1964. Vol. 3. №4.
13. Справочник по теплообменникам / В. 2-х томах. М. Энергия 1986.
14. Гаврилов А.Ф., Малкин Б.М. Загрязнение и очистка поверхностей нагрева котельных установок. М.: Энергия. 1980.
15. Кузнецов В.А. Загрязнение конвективных поверхностей парогенераторов инерционными фракциями уноса // Изв. Вузов. Энергетика. 1970. №9. с. 56–62.
16. Уоткинсон, Мартинец. Отложения карбоната на стенах труб теплообменника // Теплопередача, 1975. №4 с. 5–11.
17. Вермс. Термофорез – интенсивное осаждение частиц в межлопаточных каналах решёток газовых турбин// Энергетические машины и установки. 1979. №4. с. 56–64.
18. Жимерин Д.Г. Современные проблемы энергетики. М.: Энергоатомиздат, 1984.
19. Монин О.В., Спокойный Ф.Е. теплообмен цилиндра с поперечным слабозапыленным потоком при наличии сыпучих отложений // Теплоэнергетика. 1982, №9. с. 67–68.
20. Крэйт Ф., Блэк У. Основы теплопередачи. М.: Мир. 1983.
21. Фраас, Оцисик. Расчёт и проектирование теплообменников. М.: Атомиздат. 1971.
22. Коваленко Л.М., Глушков А.Ф. Теплообменники с интенсификацией теплоотдачи. М.: Энергоатомиздат, 1986.
23. Анипко О.Б., ТОВАЖНЯНСКИЙ Л.Л., Капустенко П.А. Исследование теплогидравлических характеристик пластинчатых теплообменных аппаратов. Харьков. ХГПУ, 1998. с. 36.
24. ТОВАЖНЯНСКИЙ Л.Л., Анипко О.Б. и др. Основы энерготехнологии промышленности. Харьков. НТУ «ХПИ», 2002, 426 с.
25. Анипко О.Б., Гогенко А.Л. Проблема образования отложений на теплообменных поверхностях пластинчатых теплообменников.\\ Интегрированные технологии и энергосбережение №4, 2004. С. 7–13.
26. Анипко О.Б., Арсеньева О.П., Гогенко А.Л. Изменение термического сопротивления отложений на теплопередающей поверхности работающего теплообменника.\\ Сб. наук. праць. XI ВПС., Вип 2(11), 2004. С. 198–202.
27. Anipko O., Gogenko A., Arsenyeva O., Kapystenko P. Accounting for fouling in plate heat exchanger design\ Chemical engineering transaction. Vol.12, 2007. pp. 207–212.

Bibliography (transliterated)

1. RTM 26-01-36-70.
2. Puchkov P.I., Vinogradov O.S. Issledovanie teplootdachi i gidravlicheskih soprotivlenij kanalov s teplootdajushhej vnutrennej poverhnost'ju Teplojenergeti-ka, 1964. #10. P. 62–65.
3. Anipko O.B. Racional'nye teploobmennye poverhnosti. Har'kov: HVU., 1998. 197 p.

4. Shicman M.E., Egorov Je.D. O dinamike rosta otlozhenij solej v intensivno obogrevaemyh trubah NRCh kotla SND bloka 300 MVt Teplojenergetika. 1969. #4 p. 10–14.
5. Koshkin V.K., Kalinin Je.K. Teploobmennye apparaty i teplonositeli. M. Mashinostroenie. 1971.
6. Anipko B.V. Problema zagrijaznenija teploobmennih ustrojstv i prognoznaja ocenka ih termicheskogo soprotivlenija teploperedache. Preprint IPMash AN USSR. Har'kov, 1987 g.
7. Ladislav Novak Fouling of compact heat exchangers. Alfa-laval www.alfalaval.com.2004.
8. Platinchatye teploobmenniki Al'fa – Laval' – garantija uspeha vashih pro-ektov. AVOK #11, 1996 g.
9. H. Müller – Steinhagen, M.R. Malayeri, A.P. Watkinson Fouling of Heat Exchangers – New Approaches to solve an Old-problem Heat transfer engineering Vol. 26. #1, 2005. p. 1–4.
10. Burkov V.V., Indejkin A.I. Avtotraktornye radiatory. L.: Mashinostroenie, 1978.
11. Man'kovskij O.N., Tolchinskij A.R., Aleksandrov M.V. Teploobmennaja apparatura himicheskikh proizvodstv. L.: Himija, 1976.
12. Reitzer B. Rate of Scale Formation in Tubular Heat Exchangers. Ind Eng Chem. Proc. Das. And Der. 1964. Vol. 3. #4.
13. Spravochnik po teploobmennikam V. 2-h tomah. M. Jenergija 1986.
14. Gavrilov A.F., Malkin B.M. Zagrijaznenie i ochistka poverhnostej nagreva kotel'nyh ustanovok. M.: Jenergija. 1980.
15. Kuznecov V.A. Zagrijaznenie konvektivnyh poverhnostej parogeneratorov inercionnymi frakcijami unosa Izv. Vuzov. Jenergetika. 1970. #9.p. 56–62.
16. Uotkinson, Martinec. Otlozhenija karbonata na stenah trub teploobmennika Teploperedacha, 1975. #4p. 5–11.
17. Verms. Termoforez – intensivnoe osazhdenie chastic v mezhlopatochnyh kana-lah reshjotok gazovyh turbin Jenergeticheskie mashiny i ustanovki. 1979. #4.p. 56–64.
18. Zhimerin D.G. Sovremennye problemy jenergetiki. M.: Jenergoatomizdat, 1984.
19. Monin O.V., Spokojnyj F.E. teploobmen cilindra s poperechnym slabozapylennym potokom pri nalichii sypuchih otlozhenij Teplojenergetika. 1982, #9. s. 67–68.
20. Krjejt F., Bljek U. Osnovy teploperedachi. M.: Mir. 1983.
21. Fraas, Ocisik. Raschjot i konstruktirovanie teploobmennikov. M.: Atomiz-dat. 1971.
22. Kovalenko L.M., Glushkov A.F. Teploobmenniki s intensivkaciej teplo-otdachi. M.: Jenergoatomizdat, 1986.
23. Anipko O.B., Tovazhnjanskij L.L., Kapustenko P.A. Issledovanie teplogidravlicheskih harakteristik platinchatyh teploobmennih apparatov. Har'kov. HGPU, 1998.p. 36.
24. Tovazhnjanskij L.L., Anipko O.B. i dr. Osnovy jenergotehnologii promyshlennosti. Har'kov. NTU «HPI», 2002, 426p.
25. Anipko O.B., Gogenko A.L. Problema obrazovanija otlozhenij na teploob-mennyh poverhnostjah platinchatyh teploobmennikov. Integrirovannye tehnologii i jenergosberezenie #4, 2004. p. 7–13.
26. Anipko O.B., Arsen'eva O.P., Gogenko A.L. Izmenenie termicheskogo soprotivlenija otlozhenij na teploperedajushhej poverhnosti rabotajushhego teploobmen-nika. \ Sb. nauk. prac'. HI VPS., Vip 2(11), 2004. p. 198–202.

27. Anipko O., Gogenko A., Arsenyeva O., Kapystenko P. Accounting for fouling in plate heat exchanger design Chemical engineering transaction. Vol.12, 2007. p. 207–212.

Аніпко О.Б., Новіков А.І., Савченко В.А.

**ОСНОВНІ ФАКТОРИ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА УТВОРЕННЯ ВІДКЛАДЕНЬ
І ЗАСОБИ БОРотьБИ ІЗ ЗАБРУДНЕННЯМИ ТЕПЛООБМІННОЇ ПОВЕРХНІ
ПЛАСТИНЧАСТОГО ТЕПЛООБМІННОГО АПАРАТУ**

У роботі проаналізовано основні фактори, що впливають на утворення відкладень у ТА. Розглянуто засоби боротьби із забрудненнями теплообмінної поверхні пластинчастого теплообмінного апарату.

УДК 620.91

Редько А.А.

**ГИБРИДНАЯ ТОПЛИВНО-ГЕОТЕРМАЛЬНАЯ СИСТЕМА
ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ С АВТОНОМНЫМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕМ***Харьковский государственный технический университет
строительства и архитектуры*

Введение. Геотермальные энергетические станции характеризуются недостаточно высокой термодинамической эффективностью, КПД которых составляет около 12÷15%. Использование геотермальной энергии совместно с топливными установками позволяет повысить эффективность комбинированной или гибридной тепловой схемы, т.к даже незначительное замещение топливной составляющей обеспечивает технико-экономическую эффективность; глубокая утилизация геотермальной энергии обеспечивается применением комбинированной схемы с теплонаносной установкой (ТНУ) [1]. Высокотемпературные геотермальные ТНУ могут использоваться в системах отопления зданий с температурным режимом 85/60 °С. Однако, в зависимости от коэффициента преобразования ТНУ потребление электроэнергии является значительным.

Таким образом, учитывая электропотребление в комбинированной геотермальной энергетической станции на привод насосов обратной закачки геотермальной жидкости в нагнетательную скважину для поддержания давления в пласте, на привод циркуляционных насосов ГТРИ системы теплоснабжения, на привод насосов, вентиляторов, дымососов отопительной (пиковой) котельной установки, на привод компрессоров ТНУ, значительные затраты электроэнергии на собственные нужды снижают термодинамическую эффективность и технико-экономические показатели геотермальной станции.

Одно из направлений использования возобновляемых видов энергии – это объединение их с обычными (органическими) источниками энергии для того, чтобы продлить существование сокращающихся органических ресурсов и создать новое направление по использованию возобновляемых видов энергии на существующем рынке ресурсов.

Состояние проблемы. Гибридные энергетические станции объединяют два различных источника энергии на одной станции, чтобы достичь более высокой эффективности использования, чем на каждой отдельной станции.

Один из путей достижения этого – соединить топливную и геотермальную станции таким образом, чтобы создать станцию, которая превосходит две отдельные современные станции: одну, использующую ископаемое органическое топливо, и одну геотермальную станцию. В [2–5] приводятся результаты исследования использования теплоты уходящих газов газоперекачивающих агрегатов с температурой 400÷500 °С для производства электроэнергии на компрессорных станциях магистральных газопроводов. Показано, что использование n-пентановой утилизационной турбины позволяет получить дополнительную мощность до 9,5 МВт при мощности газоперекачивающего агрегата 16 МВт. Значительные ресурсы низкопотенциальной теплоты имеются на отопительных и промышленных котельных. Так, в котлах мощностью от 10 до 100 Гкал/ч при температуре уходящих газов с температурой 200 °С, при условии охлаждения продуктов сгорания до 55 °С можно получить дополнительную выработку электроэнергии

от 103 до 1030 кВт в n-бутановом утилизационном цикле. Величина потребляемой мощности на привод циркуляционных насосов, дымососов, вентиляторов отопительной котельной с водогрейными котлами КВ-ГМ-10-150 или КВ-ГМ-100 составляет от 58,3 до 930 кВт [3] на котельную установку. Так, выработка электроэнергии в количестве 1030 кВт обеспечивает потребление электроэнергии на собственные нужды двух котлов типа КВ-ГМ-50 и большее количество котлов с меньшей теплопроизводительностью.

Однако, обеспечить адиабатное расширение пара в турбине от 185 °С до 45 °С не представляется возможным и реальная температура рабочего вещества в утилизационном цикле будет выше, а выработка электроэнергии будет меньше, что зависит от расхода рабочего вещества в цикле. При этом в низкотемпературных преобразователях тепловой энергии в электрическую широко применяются другие рабочие вещества, которые также являются эффективными. Как показывают результаты выполненных исследований, более эффективными являются многоступенчатые (каскадные) энергетические станции [7]. Применение нескольких рабочих веществ в каскадном цикле позволяет обеспечить выработку электроэнергии в несколько раз больше по сравнению с одноступенчатой энергетической установкой.

Основные результаты. Ниже проводится описание гибридной топливно-геотермальной системы теплоснабжения, состоящей из геотермальной циркуляционной системы, топливной котельной установки и теплонаносной установки. Аналогичная система приведена в [6].

Тепловая схема гибридной системы геотермального теплоснабжения, включающая в себя источник геотермальной энергии и геотермальную циркуляционную систему, источник топливной энергии – котельную установку с несколькими котлами на органическом топливе, теплонаносную установку (рис.1).

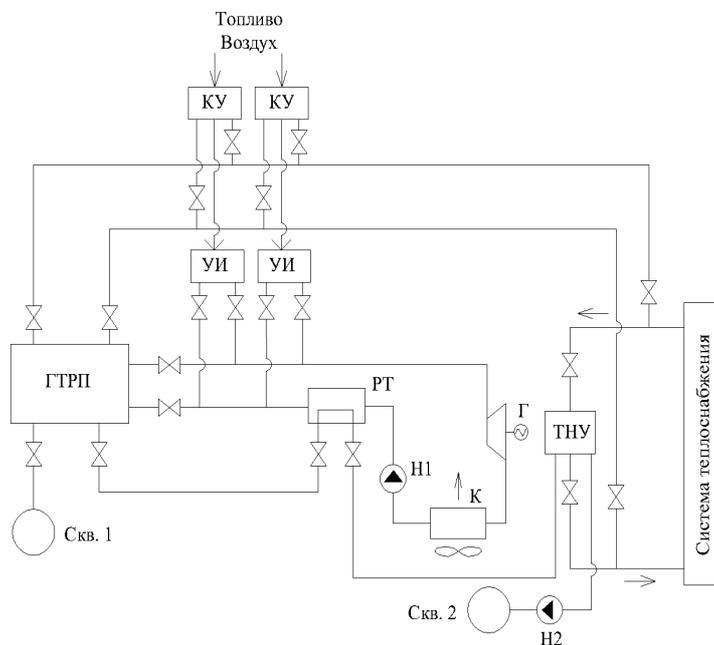


Рисунок 1 – Тепловая схема гибридной топливно-геотермальной системы теплоснабжения: ТНУ – теплонаносная установка; Г – генератор; Скв 1, Скв 2 – скважины эксплуатационная и нагнетательная; Н2 – насос геотермальной циркуляционной системы; РТ – регенеративный теплообменник, КУ – котельная установка; УИ – утилизатор-испаритель; К – конденсатор; Н1 – насос бинарного цикла; ГТРП – геотермальный теплораспределительный пункт

Учитывая, что коэффициент использования топлива топливной установки при расчете теплового баланса по высшей теплоте сгорания топлива составляет около 85–86 %, имеется возможность использования низкотемпературной теплоты отходящих газов котельных агрегатов для выработки электроэнергии.

Результаты исследований геотермальных электрических станций с одноступенчатым бинарным циклом показывают возможность выработки 35–43 кВт/(кг/с) электроэнергии при температуре геотермальной жидкости 130 °С [7].

При использовании каскадной энергетической установки выработка электроэнергии увеличивается до 65–75 кВт/(кг/с) [7].

Автором совместно с «Укрнефтезапчасть» г. Сумы разработана блочно-модульная энергетическая станция на базе парового турбогенераторного агрегата со струйно-реактивной турбиной ПТГА-СРТ-24/0,5.

Электрическая мощность станции составляет 1,5–2,5 МВт. Установка может быть интегрирована в систему геотермального теплоснабжения с целью выработки электроэнергии для потребления на собственные нужды.

Сравнивая варианты теплоснабжения от котельной и теплонасосной установки, можно отметить следующие преимущества применения ТНУ:

– экологические преимущества: отсутствие выбросов в атмосферу при снижении органического топлива;

– разгрузка транспорта от топливных перевозок.

ТНУ потребляют электроэнергию для выработки теплоты согласно схеме: тепло органического топлива → электроэнергия → тепло для теплоснабжения. Сравнимым вариантом является непосредственное сжигание органического топлива для теплоснабжения.

Результаты расчетов показывают, что при наличии источника низкопотенциальной теплоты с положительной температурой применение ТНУ с коэффициентом преобразования $\varphi > 2,2$ имеет преимущества по сравнению с котельной установкой с КПД 65 %. Коэффициент экономии топлива равен 1,8 и выше. Себестоимость производства теплоты с помощью ТНУ зависит от цены электроэнергии и цены тепловой энергии. Так, затраты электроэнергии на выработку теплоты ТНУ с $\varphi = 4,3 \div 5,2$ составляет 262,2–269,5 кВтч/Гкал при условии, что температура сетевой воды 62 °С, а температура источника теплоты 25–32 °С. Себестоимость тепловой энергии составляет около 8,1–9,8 долл/Гкал.

В гибридной топливно-геотермальной энергетической станции часть органического топлива замещается геотермальной энергией, что снижает себестоимость выработки электроэнергии, которая используется в ТНУ для производства теплоты.

Составляющие элементы тепловой схемы системы теплоснабжения характеризуются высокой термодинамической эффективностью.

Геотермальная циркуляционная система характеризуется высоким значением коэффициента утилизации, составляющим 85–90 %. Топливная составляющая характеризуется высоким значением КПД 98–99 % за счет использования теплоты уходящих газов. Выработка электроэнергии обеспечивается за счет утилизации низкотемпературной теплоты топливной части установки. Производство теплоты ТНУ осуществляется автономной электрической станцией.

Регулирование производства и отпуска теплоты потребителям осуществляется всеми элементами системы теплоснабжения. Составляющие элементы системы находятся в эксплуатации круглогодично.

Топливная и геотермальная составляющая системы производят теплоту для нужд горячего теплоснабжения, а ТНУ подключается в пиковом режиме отопления. Электрическая часть системы в зависимости от нагрузки обеспечивается подключением (или отключением) отдельных модулей.

Выводы. Предлагаемая гибридная топливно-геотермальная система теплоснабжения характеризуется высокими значениями термодинамической эффективности и может быть использована при температуре геотермальной жидкости 60–65 °С и выше.

Литература

1. ВСН 56-87. Геотермальное теплохладоснабжение жилых и общественных зданий и сооружений. Нормы проектирования. – М.:ЦНИИЭП инженерного оборудования, 1988.
2. Карп И.Н. Эффективное производство энергии на компрессорных станциях магистральных газопроводов / И.Н. Карп, Р.М. Говдяк, И.М. Калатунь // Экотехнологии и ресурсосбережение. – 2002. – №3. – С. 12–22.
3. Шварц Г.Р. Утилизационные энергетические установки с органическими теплоносителями / Г.Р. Шварц, С.В. Голубев, Б.П. Левыкин // Газовая промышленность. – 2000. – №6. – С. 12.
4. Пятничко В.А. Утилизация низкопотенциального тепла в энергетических установках с органическим теплоносителем / В.А. Пятничко // Экотехнологии и ресурсосбережение. – 2002. – №5. – С. 10–14.
5. Пятничко В.А. Утилизация низкопотенциального тепла для производства электроэнергии на компрессорных станциях / В.А. Пятничко, Т.К. Крушневич, А.И. Пятничко // Экотехнологии и ресурсосбережение. – 2003. – №4. – С. 3–4.
6. Редько А.А. Гибридная топливно-геотермальная энергетическая станция / А.А. Редько // Энергосбережение, энергетика, энергоаудит. – 2009. – №2. – С. 68–76.
7. Редько А.А. Анализ термодинамических параметров циклов геотермальных электрических станций / А.А. Редько // Энергетика: економіка, технології, екологія. – 2009. – №2. – С. 65–78.

Bibliography (transliterated)

1. VSN 56-87. Geothermal'noe teplohladosnabzhenie zhilyh i obshhestvennyh зда-nij i sooruzhenij. Normy proektirovaniya. – М.:СНИИЭП инженерного оборудования, 1988.
2. Karp I.N. Jefferktivnoe proizvodstvo jenerгии na kompressornyh stancijah magistral'nyh gazoprovodov / I.N. Karp, R.M. Govdjak, I.M. Kalatun' Jekotehnologii i resursosberezhenie. – 2002. – #3. – p. 12–22.
3. Shvarc G.R. Utilizacionnye jenergeticheskie ustanovki s organichesкими teplonositeljami / G.R. Shvarc, S.V. Golubev, B.P. Levykin / Gazovaja promyshlennost'. – 2000. – #6. – p. 12.
4. Pjatnichko V.A. Utilizacija nizkopotencial'nogo tepla v jenergeticheskikh ustanovkah s organichesким teplonositelem / V.A. Pjatnichko / Jekotehnologii i resursosberezhenie. – 2002. – #5. – p. 10–14.
5. Pjatnichko V.A. Utilizacija nizkopotencial'nogo tepla dlja proizvodstva jelektrojenerгии na kompressornyh stancijah / V.A. Pjatnichko, T.K. Krushnevich, A.I. Pjatnichko / Jekotehnologii i resursosberezhenie. – 2003. – #4. – p. 3–4.

6. Red'ko A.A. Gibridnaja toplivno-geotermal'naja jenergeticheskaja stancija A.A. Red'ko Jenergoberezhnie, jenergetika, jenergoaudit. – 2009. – #2. – p. 68–76.

7. Red'ko A.A. Analiz termodinamicheskikh parametrov ciklov geotermal'nyh jelektricheskikh stancij A.A. Red'ko Energetika: ekonomika, tehnologii, ekologija. – 2009. – #2. – p. 65–78.

УДК 620.91

Редько А.О.

**ГІБРИДНА ПАЛИВНО-ГЕОТЕРМАЛЬНА СИСТЕМА ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ
З АВТОНОМНИМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯМ**

Наведена теплова схема високоефективної системи геотермального теплопостачання.

Red'ko A.O.

**THE HYBRID FUEL-GEOTHERMAL SYSTEM OF THE HEAT SUPPLY
WITH INDEPENDENT ELECTROSUPPLY**

In this article is resulted the thermal scheme of highly effective system of a geothermal heat supply.

УДК 621.324.57

Александров Є.Є., Александрова Т.Є., Костяник І.В.

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ПАЛИВОПОДАВАННЯ В ЕНЕРГОБЛОЦІ МІНІЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ ДГУ-315

1. Постановка задачі. В Україні мініелектростанції випускаються Державним підприємством «Завод імені Малишева» на основі серійних танкових двигунів 5ТДФ (ДГУ-200 потужністю 200 кВт) і 6ТД-1 (ДГУ-315 потужністю 315 кВт), підвищений ресурс яких забезпечується дефорсуванням базових двигунів за рівнем потужності. Ці електростанції випускаються як в стаціонарному, так і в рухомому варіантах і знаходять широке застосування для енергопостачання знеструмлених внаслідок стихійного лиха населених пунктів, установ, медичних закладів та харчових під-

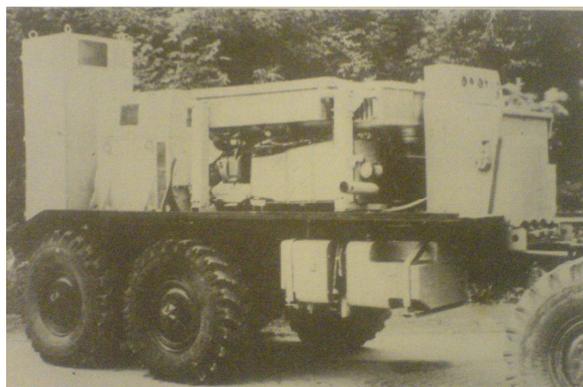


Рисунок 1 – Зовнішній вигляд рухомого варіанту мініелектростанції ДГУ-315

приємств, а також для забезпечення електроенергією геолого-розвідувальних робіт.

На рис. 1 приведений зовнішній вигляд рухомого варіанту мініелектростанції ДГУ-315, а на рис. 2 – схема цифрового електрогідравлічного регулятора паливоподавання дизеля 6ТД-1 [1]. Дизель 6ТД-1 містить індукційні датчики кутової швидкості колінчастого валу і положення рейки паливного насосу. Зміна електричного навантаження з боку споживачів електричної енергії приводить до зміни моменту на валу ротора синхронного генератора і механічно з'єданого з ним колінчастого валу, що, в свою чергу, приводить до зміни кутової швидкості

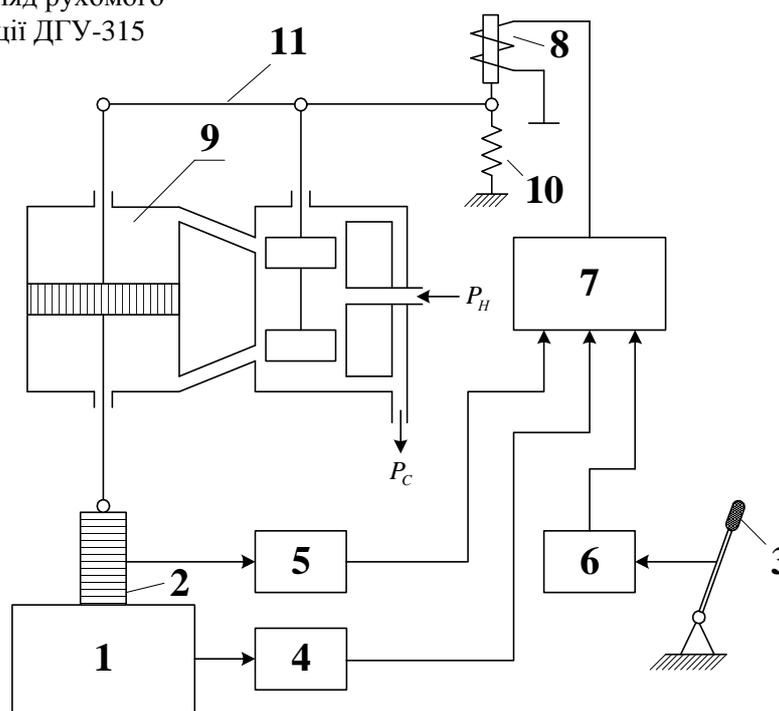


Рисунок 2 – Електрогідравлічний регулятор паливоподавання дизеля 6ТД-1: 1 – дизель; 2 – рейка паливного насоса; 3 – важіль настройки; 4 – індукційний датчик кутової швидкості обертання колінчастого валу; 5 – індукційний датчик положення рейки паливного насоса; 6 – датчик важеля настройки; 7 – електронний блок; 8 – електромагніт; 9 – серво-мотор; 10 – фіксуюча пружина

обертання колінчастого валу. При цьому електронний блок 7 виробляє сигнал керування, що подається до обмотки електромагніту 8, якор якого переміщує важіль 11 сервомотору 9. Переміщення поршня паливного сервомотору 9 приводить до відповідного переміщення рейки паливного насосу 2, що викликає зміну активного моменту на колінчастому валу, яка компенсує збурюючу зміну моменту навантаження з боку ротора синхронного генератора. Для покращення динамічних властивостей процесу паливоподавання регулятор охоплений від'ємним зворотнім зв'язком по переміщенню рейки паливного насосу за допомогою датчика 5. При постійному положенні важеля 3 і при постійному навантаженні на колінчастому валу дизеля 1 мініелектростанція працює в сталому режимі. При зміні електричного навантаження в системі відхилення сигналу керування на виході електронного блоку 7 складає

$$\Delta u(t) = k_{\omega} \cdot \Delta \omega(t) + k_h \cdot \Delta h(t), \quad (1)$$

де $\Delta \omega(t)$, $\Delta h(t)$ – відхилення кутової швидкості колінчастого валу енергоблоку і переміщення рейки паливного насосу від їх значень у сталому режимі.

Метою цієї роботи являється визначення значень коефіцієнтів підсилення k_{ω} і k_h , що забезпечують необхідні динамічні характеристики процесу паливоподавання в енергоблоці мініелектростанції ДГУ-315.

2. Математична модель дизеля 6ТД-1 як об'єкту керування. Запишемо рівняння динамічної рівноваги дизеля [2]

$$I_{\Sigma} \frac{d\omega(t)}{dt} = M_D[\omega(t), h(t)] - M_H[\omega(t), t], \quad (2)$$

де активний момент $M_D[\omega(t), h(t)]$ деформованого дизеля 6ТД-1 дорівнює

$$M_D[\omega(t), h(t)] = -0,76 \cdot 10^5 [h(t - \tau) - 0,024] \times \\ \times [1 + 0,33 \cdot 10^{-2} \omega(t) - 0,11 \cdot 10^{-4} \omega^2(t)]. \quad (3)$$

Скориставшись результатами роботи [2], рівняння збуреного руху дизеля подано у вигляді

$$\frac{d\Delta \omega(t)}{dt} = -\frac{F_{до}}{I_{\Sigma}} \Delta \omega(t) + \frac{1}{I_{\Sigma}} \Delta M_D(t) + \frac{1}{2! I_{\Sigma}} \left(\frac{\partial^2 M_D}{\partial \omega^2} \right)_0 \Delta \omega^2(t) + \\ + \frac{1}{2! I_{\Sigma}} \left(\frac{\partial^2 M_D}{\partial \omega \partial h} \right)_0 \left(\frac{\partial M_D}{\partial h} \right)_0^{-1} \Delta \omega(t) \Delta M_D(t) + \\ + \frac{1}{3! I_{\Sigma}} \left(\frac{\partial^3 M_D}{\partial \omega^2 \partial h} \right)_0 \left(\frac{\partial M_D}{\partial h} \right)_0^{-1} \Delta \omega^2(t) \Delta M_D(t) - \frac{1}{I_{\Sigma}} \Delta M_H(t). \quad (4)$$

Зв'язок між функціями $\Delta M_D(t)$ і $\Delta h(t)$ запишемо у відповідності до роботи [2] у вигляді диференціального рівняння другого порядку

$$T_{\tau}^2 \frac{d^2 \Delta M_{\text{Д}}(t)}{dt^2} + 2T_{\tau} \frac{d \Delta M_{\text{Д}}(t)}{dt} + \Delta M_{\text{Д}}(t) = \left(\frac{\partial M_{\text{Д}}}{\partial h} \right)_0 \Delta h(t), \quad (5)$$

де постійна часу T_{τ} дорівнює

$$T_{\tau} = \frac{2\pi}{l\omega_0}, \quad (6)$$

а через l позначена кількість циліндрів дизеля (для дизеля 6ТД-1 $l=6$).

Користуючись формулами (3) і (6), а також враховуючи, що $I_{\Sigma} = 4,9 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2$, обчислено коефіцієнти диференціальних рівнянь (4) і (5):

$$\begin{aligned} \frac{F_{\text{Д}0}}{I_{\Sigma}} &= 0,39 \text{ с}^{-1}; & \frac{1}{I_{\Sigma}} &= 0,204 \text{ Н}^{-1} \text{ м}^{-1} \text{ с}^{-2}; & T_{\tau} &= 0,33 \cdot 10^{-2} \text{ с}; \\ \frac{1}{2!I_{\Sigma}} \left(\frac{\partial^2 M_{\text{Д}}}{\partial \omega^2} \right)_0 &= -1,23 \cdot 10^{-3}; & \left(\frac{\partial M_{\text{Д}}}{\partial h} \right)_0 &= -0,73 \cdot 10^5 \text{ Н}; \\ \frac{1}{2!I_{\Sigma}} \left(\frac{\partial^2 M_{\text{Д}}}{\partial \omega \partial h} \right)_0 \left(\frac{\partial M_{\text{Д}}}{\partial h} \right)_0^{-1} &= -0,46 \cdot 10^{-3} \text{ Н}^{-1} \text{ м}^{-1} \text{ с}^{-1}; \\ \frac{1}{3!I_{\Sigma}} \left(\frac{\partial^3 M_{\text{Д}}}{\partial \omega^2 \partial h} \right)_0 \left(\frac{\partial M_{\text{Д}}}{\partial h} \right)_0^{-1} &= -0,94 \cdot 10^{-6} \text{ Н}^{-1} \text{ м}^{-1}. \end{aligned}$$

Тоді рівняння (4) і (5) приймають вигляд:

$$\begin{aligned} \frac{d\Delta\omega(t)}{dt} &= -0,39\Delta\omega(t) + 0,204\Delta M_{\text{Д}}(t) - 1,23 \cdot 10^{-3} \Delta\omega^2(t) - \\ &- 0,46 \cdot 10^{-3} \Delta\omega(t) \Delta M_{\text{Д}}(t) - 0,94 \cdot 10^{-6} \Delta\omega^2(t) \Delta M_{\text{Д}}(t) - 0,204 \Delta M_{\text{Н}}(t); \quad (7) \\ 0,11 \cdot 10^{-4} \frac{d^2 \Delta M_{\text{Д}}(t)}{dt^2} &+ 0,66 \cdot 10^{-2} \frac{d \Delta M_{\text{Д}}(t)}{dt} + \Delta M_{\text{Д}}(t) = -0,73 \cdot 10^5 \Delta h(t). \end{aligned}$$

3. Математична модель регулятора паливоподавання. Диференціальні рівняння, що описують збудований рух електромагніту, записуються [4]

$$\begin{aligned} L_y \frac{d\Delta i_y(t)}{dt} + r_y \Delta i_y(t) &= \Delta u(t); \\ m \frac{d^2 \Delta y(t)}{dt^2} + f \frac{d \Delta y(t)}{dt} + c \Delta y(t) &= k_M \Delta i_y(t), \end{aligned} \quad (8)$$

де $i_y(t)$ – електричний струм в обмотці електромагніту; $y(t)$ – переміщення якоря електромагніту; L_y – індуктивність обмотки; r_y – активний опір обмотки; m – приведена до рейки маса рухомих частин системи паливоподавання; f – коефіцієнт демпфування системи паливоподавання; c – коефіцієнт жорсткості пружного елемента електромагніту.

Рівняння збуреного руху паливного сервомотору має вигляд

$$T_h \frac{d\Delta h(t)}{dt} + \Delta h(t) = \Delta y(t), \quad (9)$$

Рівняння (8) подамо у вигляді

$$\frac{L_y}{r_y} \frac{d\Delta i_y(t)}{dt} + \Delta i_y(t) = \frac{1}{r_y} \Delta u(t); \quad (10)$$

$$\frac{m}{c} \frac{d^2\Delta y(t)}{dt^2} + \frac{f}{c} \frac{d\Delta y(t)}{dt} + \Delta y(t) = \frac{k_M}{c} \Delta i_y(t). \quad (11)$$

Введемо позначення

$$\frac{L_y}{r_y} = T_y; \quad \frac{1}{r_y} = k_y; \quad \frac{m}{c} = T_{я1}^2; \quad \frac{f}{c} = T_{я2}; \quad \frac{k_M}{c} = k_{я}.$$

Враховуючи, що [4]

$$L_y = 0,01 \text{ Гн}; \quad r_y = 100 \text{ Ом}; \quad m = 0,01 \text{ Н} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{с}^2; \\ f = 0,55 \text{ Н} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{с}; \quad c = 100 \text{ Н} \cdot \text{м}^{-1}; \quad k_M = 100 \text{ Н} \cdot \text{А}^{-1},$$

отримуємо значення постійних часу і коефіцієнтів посилення електромагніту

$$T_y = 10^{-4} \text{ с}; \quad k_y = 10^{-2} \text{ Ом}^{-1}; \quad T_{я1}^2 = 10^{-4} \text{ с}; \\ T_{я2} = 0,55 \cdot 10^{-2} \text{ с}; \quad k_{я} = 1 \text{ м} \cdot \text{А}^{-1}; \quad T_h = 0,5 \cdot 10^{-1} \text{ с}.$$

З урахуванням формул (7), (8) і (9), запишемо диференціальні рівняння збуреного руху замкненої системи керування енергоблоком мініелектростанції ДГУ-315:

$$\begin{aligned} \frac{d\Delta\omega(t)}{dt} = & -0,39\Delta\omega(t) + 0,204\Delta M_{Д}(t) - \\ & -1,23 \cdot 10^{-3} \Delta\omega^2(t) - 0,46 \cdot 10^{-3} \Delta\omega(t) \Delta M_{Д}(t) - \\ & -0,94 \cdot 10^{-6} \Delta\omega^2(t) \Delta M_{Д}(t) - 0,204\Delta M_{H}(t); \\ 0,11 \cdot 10^{-4} \frac{d^2\Delta M_{Д}(t)}{dt^2} + & 0,66 \cdot 10^{-2} \frac{d\Delta M_{Д}(t)}{dt} + \Delta M_{Д}(t) = -0,73 \cdot 10^5 \Delta h(t); \quad (12) \\ 10^{-4} \frac{d\Delta i_y(t)}{dt} + \Delta i_y(t) = & 10^{-2} [k_{\omega} \Delta\omega(t) + k_h \Delta h(t)]; \\ 10^{-4} \frac{d^2\Delta y(t)}{dt^2} + 0,55 \cdot 10^{-2} \frac{d\Delta y(t)}{dt} + & \Delta y(t) = \Delta i_y(t); \\ 0,5 \cdot 10^{-1} \frac{d\Delta h(t)}{dt} + \Delta h(t) = & \Delta y(t). \end{aligned}$$

Система першого наближення, що відповідає нелінійній системі (12), записується у вигляді

$$\begin{aligned} \frac{d\Delta\omega(t)}{dt} &= -0,39\Delta\omega(t) + 0,204\Delta M_{Д}(t) - 0,204\Delta M_{H}(t); \\ \frac{d^2\Delta M_{Д}(t)}{dt^2} &= -0,91 \cdot 10^5 \Delta M_{Д}(t) - 0,6 \cdot 10^3 \frac{d\Delta M_{Д}(t)}{dt} - 0,66 \cdot 10^{10} \Delta h(t); \\ \frac{d\Delta i_y(t)}{dt^2} &= -10^4 \Delta i_y(t) + 10^2 [k_{\omega}\Delta\omega(t) + k_h\Delta h(t)]; \\ \frac{d^2\Delta y(t)}{dt^2} &= -10^4 \Delta y(t) - 0,55 \cdot 10^2 \frac{d\Delta y(t)}{dt} + 10^4 \Delta i_y(t); \\ \frac{d\Delta h(t)}{dt} &= -200 \cdot \Delta h(t) + 200 \cdot \Delta y(t). \end{aligned} \quad (13)$$

4. Характеристичне рівняння замкненої системи паливоподавання. Для отримання характеристичного рівняння будемо розглядати замкнену систему паливоподавання у вигляді наступної структурної схеми, що подана на рис.3.

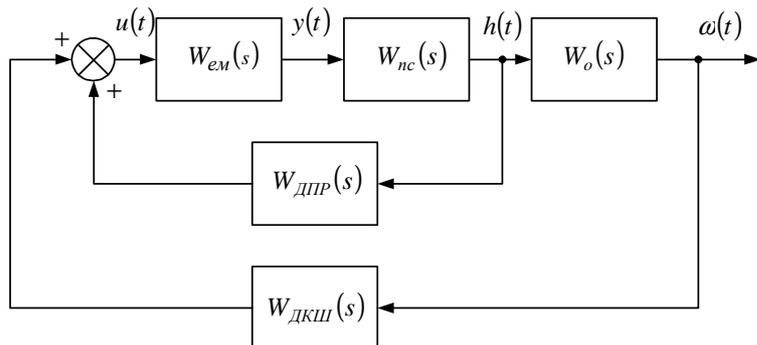


Рисунок 3 – Структурна схема замкненої системи паливоподавання енергоблоку БТД-1 мініелектростанції ДГУ-315

На рис.3. прийняті позначення: $W_{ем}(s)$ – передавальна функція електромагніта; $W_{нс}(s)$ – передавальна функція паливного сервомотора; $W_{о}(s)$ – передавальна функція об'єкту керування; $W_{ДПП}(s)$ – передавальна функція датчика положення рейки паливного насосу; $W_{ДКШ}(s)$ – передавальна функція датчика кутової швидкості колінчастого валу.

З системи диференціальних рівнянь (13) маємо

$$\begin{aligned} W_o(s) &= -\frac{0,46 \cdot 10^5}{(2,56s+1)(0,11 \cdot 10^{-4} s^2 + 0,66 \cdot 10^{-2} s + 1)}; \\ W_{ем}(s) &= \frac{10^{-2}}{(10^{-4} s + 1)(10^{-4} s^2 + 0,55 \cdot 10^{-2} s + 1)}; \\ W_{нс}(s) &= \frac{1}{(0,5 \cdot 10^{-2} s + 1)}; \\ W_{ДПП}(s) &= k_h; \quad W_{ДКШ}(s) = k_{\omega}. \end{aligned} \quad (14)$$

Передавальна функція внутрішнього замкненого контуру структурної схеми записується у вигляді

$$W_g(s) = \frac{W_{em}(s) \cdot W_{nc}(s)}{1 - W_{em}(s) \cdot W_{nc}(s) \cdot W_{ДПП}(s)}, \quad (15)$$

а передавальна функція зовнішнього замкненого контуру – у вигляді

$$W_3(s) = \frac{W_g(s) \cdot W_o(s)}{1 - W_g(s) \cdot W_o(s) \cdot W_{ДКШ}(s)}. \quad (16)$$

Підставимо (15) в (16)

$$W_3(s) = \frac{\frac{W_{em}(s) \cdot W_{nc}(s) \cdot W_o(s)}{1 - W_{em}(s) \cdot W_{nc}(s) \cdot W_{ДПП}(s)}}{1 - \frac{W_{em}(s) \cdot W_{nc}(s) \cdot W_o(s) \cdot W_{ДКШ}(s)}{1 - W_{em}(s) \cdot W_{nc}(s) \cdot W_{ДПП}(s)}}}. \quad (17)$$

В результаті отримуємо характеристичне рівняння замкненої системи паливоподавання

$$1 - W_{em}(s) \cdot W_{nc}(s) \cdot W_{ДПП}(s) - W_{em}(s) \cdot W_{nc}(s) \cdot W_o(s) \cdot W_{ДКШ}(s) = 0 \quad (18)$$

У рівнянні (18) підставимо співвідношення (14). В результаті отримуємо характеристичне рівняння у вигляді:

$$\begin{aligned} &0,14 \cdot 10^{-14} \cdot s^7 + 0,151 \cdot 10^{-10} \cdot s^6 + 0,122 \cdot 10^{-7} \cdot s^5 + 0,377 \cdot 10^{-5} \cdot s^4 + \\ &+ (0,538 \cdot 10^{-3} + 0,28 \cdot 10^{-6} k_h) \cdot s^3 + (0,442 \cdot 10^{-1} + 0,169 \cdot 10^{-3} k_h) \cdot s^2 + \\ &+ (2,58 + 0,257 \cdot 10^{-1} k_h) \cdot s + 1 + 10^{-2} k_h - 0,46 \cdot 10^3 \cdot k_\omega = 0. \end{aligned} \quad (19)$$

5. Моделювання динамічних процесів в замкненій системі паливоподавання. У характеристичному рівнянні (19) покладемо $s = j \cdot \omega$, виділимо дійсну та уявну частини і дорівняємо їх нулю:

$$\begin{aligned} X(\omega, k_\omega, k_h) &= 1 + 0,46 \cdot 10^3 \cdot k_\omega - (10^{-2} - 0,169 \cdot 10^{-3} \omega^2) k_h - 0,442 \cdot 10^{-1} \omega^2 + \\ &+ 0,377 \cdot 10^{-5} \omega^4 - 0,151 \cdot 10^{-10} \omega^6 = 0; \\ Y(\omega, k_\omega, k_h) &= -(0,257 \cdot 10^{-1} \omega - 0,28 \cdot 10^{-6} \omega^3) k_h + 2,58 \omega - 0,538 \cdot 10^{-3} \omega^3 + \\ &+ 0,122 \cdot 10^{-7} \omega^5 - 0,14 \cdot 10^{-14} \omega^7 = 0. \end{aligned} \quad (20)$$

Із співвідношень (20) запишемо рівняння:

$$\begin{aligned}
 0,46 \cdot 10^3 \cdot k_{\omega} - (10^{-2} - 0,169 \cdot 10^{-3} \omega^2) k_h &= -1 + 0,442 \cdot 10^{-1} \omega^2 - \\
 &- 0,377 \cdot 10^{-5} \omega^4 + 0,151 \cdot 10^{-10} \omega^6; \\
 -(0,257 \cdot 10^{-1} \omega - 0,28 \cdot 10^{-6} \omega^3) k_h &= -2,58 \omega + 0,538 \cdot 10^{-3} \omega^3 - \\
 &- 0,122 \cdot 10^{-7} \omega^5 + 0,14 \cdot 10^{-14} \omega^7 = 0.
 \end{aligned}
 \tag{21}$$

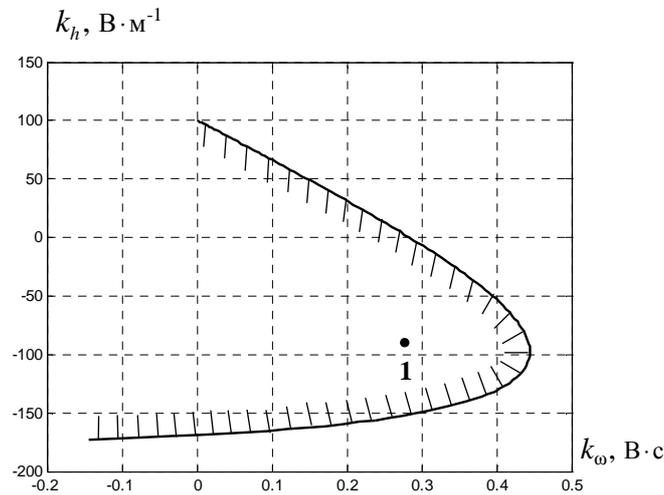


Рисунок 4 – Область стійкості замкненої системи паливоподавання дизеля БТД-1 в площині варійованих параметрів регулятора

Використовуючи рівняння (21) побудуємо в площині (k_{ω}, k_h) межу області стійкості, що представлена на рис. 4.

Для визначення області стійкості розглянемо визначник

$$\begin{aligned}
 \Delta &= \begin{vmatrix} \frac{\partial X(\omega, k_{\omega}, k_h)}{\partial k_{\omega}} & \frac{\partial X(\omega, k_{\omega}, k_h)}{\partial k_h} \\ \frac{\partial Y(\omega, k_{\omega}, k_h)}{\partial k_{\omega}} & \frac{\partial Y(\omega, k_{\omega}, k_h)}{\partial k_h} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0,46 \cdot 10^3 & -(10^{-2} - 0,169 \cdot 10^{-3} \omega^2) \\ 0 & -(0,257 \cdot 10^{-1} \omega - 0,28 \cdot 10^{-6} \omega^3) \end{vmatrix} = \\
 &= -0,46 \cdot 10^3 (0,257 \cdot 10^{-1} \omega - 0,28 \cdot 10^{-6} \omega^3).
 \end{aligned}
 \tag{22}$$

При $\omega < 958 \text{ c}^{-1}$ визначник (22) – від’ємний, тобто межу області стійкості треба штрихувати праворуч. Тоді штрих буде напрямлений усередину області стійкості.

Оберемо в області стійкості на рис.4 точку 1 з параметрами $k_{\omega} = 0,276 \text{ B} \cdot \text{c}$, $k_h = -81,7 \text{ B} \cdot \text{m}^{-1}$ і побудуємо динамічні процеси в замкненій системі паливоподавання шляхом інтегрування системи диференціальних рівнянь (12) при початкових умовах $\Delta\omega(0) = 10 \text{ c}^{-1}$; $\Delta M_D(0) = \Delta \dot{M}_D(0) = \Delta i_y(0) = \Delta y(0) = \Delta \dot{y}(0) = \Delta h(0) = 0$.

Ці процеси приведені на рис. 5. Час затухання цих процесів, тобто час, після якого має місце нерівність

$$\Delta\omega(t) < 0,05\Delta\omega(0) = 0,5 \text{ c}^{-1},$$

складає 0,25 с, тобто швидкодія системи паливоподавання з електронним регулятором майже удвічі вище, ніж швидкодія системи з гідромеханічним регулятором [2].

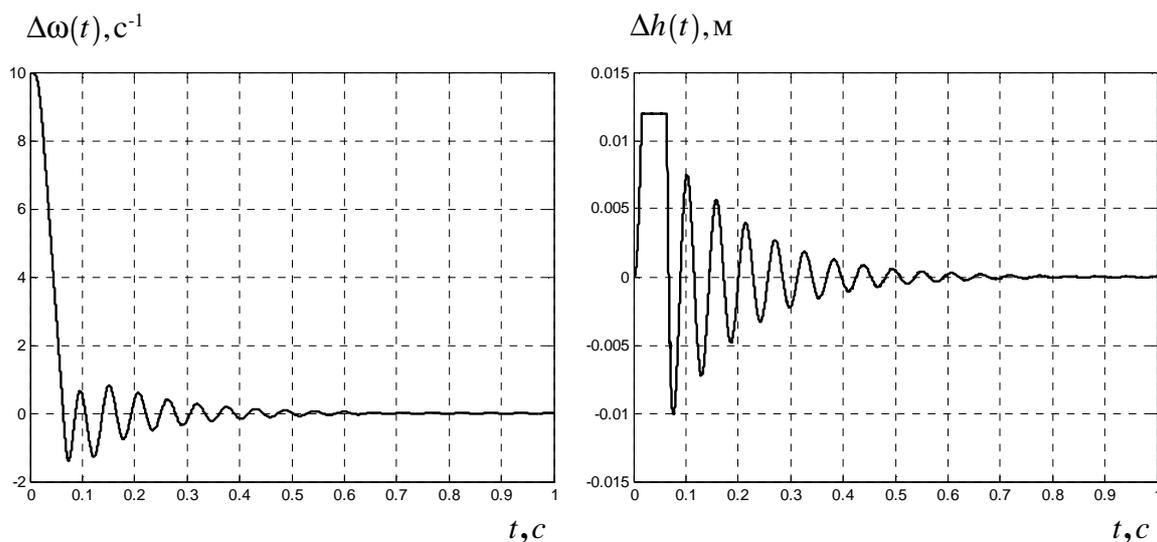


Рисунок 5 – Перехідні процеси в замкненій системі паливopодавання при $k_{\omega}^* = 0,276 \text{ В} \cdot \text{с}$, $k_h^* = -81,7 \text{ В} \cdot \text{м}^{-1}$.

Література

1. Рязанцев Н.К., Бородин Ю.С., Синельникова Л.Б. Улучшение топливной экономичности и эксплуатационных характеристик транспортных двигателей путем разработки электронных систем управления // Вестник НТУ «ХПИ», 2001.–вып.7.–с.183–192.
2. Александрова Т.Є., Костяник І.В. Математичне моделювання процесу паливopодавання в енергоблоці мініелектростанції ДГУ-200. //Механіка та машинобудування. – №1. – 2009. – с. 121–129.
3. Кац А.М. Автоматическое регулирование скорости двигателей внутреннего сгорания. – М.: Mashgiz, 1956. – 302 с.
4. Аблесімов О.К., Александров Є.Є, Александрова І.Є. Автоматичне керування рухомими об'єктами і технологічними процесами. Т.3. Автоматичне керування озброєнням танків. – Харків: НТУ «ХПИ», 2008. – 444 с.

Bibliography (transliterated)

1. Rjazancev N.K., Borodin Ju.S., Sinel'nikova L.B. Uluchshenie toplivnoj jekonomichnosti i jekspluatacionnyh karakteristik transportnyh dvigatelej putem razrabotki jelektronnyh sistem upravlenija Vestnik NTU «HPI», 2001.–vyp.7.–p.183–192.
2. Aleksandrova T.Є., Kostjanik I.V. Matematичne modeljuvannja procesu palivopodavannja v energobloci minielektrostancії DGU-200. Mehanika ta mashinobuduvannja. – #1. – 2009. – p. 121–129.
3. Kac A.M. Avtomatическое regulirovanie skorosti dvigatelej vnutrennego sgoranija. – М.: Mashgiz, 1956. – 302 p.
4. Ablesimov O.K., Aleksandrov Є.Є, Aleksandrova I.Є. Avtomatичne keruvannja ruhomimi ob'єktami i tehnologіchnimi procesami. T.3. Avtomatичne keruvannja ozbroennjam tankiv. – Harkiv: NTU «HPI», 2008. – 444 p.

УДК 621.324.57

Александров Е.Е., Александрова Т.Е., Костяник И.В.

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТОПЛИВОПОДАЧИ В ЭНЕРГОБЛОКЕ
МИНИЭЛЕКТРОСТАНЦИИ ДГУ-315**

Рассмотрена математическая модель процесса топливоподачи и переходные процессы в замкнутой системе автоматического управления топливоподачей энергоблока миниэлектростанции ДГУ-315.

Alexandrov Ye.Ye., Alexandrova T.Ye., Kostyanik I.V.

**MODELLING OF FUEL SUPPLY PROCESS IN MINIPOWER STATION DGU-315
POWER UNIT**

The mathematical model of fuel supply process and transients in the closed system of automatic control of fuel supply of minipower station DGU-315 power unit is considered.

УДК 621:664(076)

Гарев А.О., Чернышев И.С., Бабак Т.Г., Балаба Ю.О., Колесник Е.А., Сильченко К.А.

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЭНЕРГОЗАТРАТ РЕКТИФИКАЦИИ ЧАСТИЧНО РАСТВОРИМЫХ КОМПОНЕНТОВ СМЕСИ ФУРФУРОЛ-ВОДА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБАХ ОРОШЕНИЯ И ПИТАНИЯ КОЛОННЫ

Актуальность работы. Разделение азеотропных систем частично растворимых друг в друге веществ на практически чистые компоненты представляет большой интерес для ряда химических, гидролизных, нефтехимических производств. Обычно это многотоннажные производства, а поэтому вопросы энергосбережения становятся особенно актуальными. В зависимости от принадлежности смеси к эвтектическому или неэвтектическому виду, от характера кривых растворимости компонентов, а также от фазового состояния исходной смеси и качества конечных продуктов промышленности реализуются различные схемы ректификационных установок [1].

В процессах регенерации водных растворов фурфурола исходная смесь обычно содержит порядка 7–8 % мас. фурфурола, конечная концентрация дистиллята должна быть не менее 94 % мас., а водный кубовый остаток должен иметь содержание фурфурола не более 0,02 % мас. Для ректификации такой исходной смеси при таких требованиях к конечным продуктам чаще всего используют одноколонную схему с одним отстойником для декантации фаз. При этом могут быть следующие варианты: одна из фаз после отстойника используется для орошения в качестве флегмы или она подается в промежуточное сечение укрепляющей части колонны, либо смешивается с исходной смесью и подается на питание колонны [2].

Для корректной оценки рассчитаем энергозатраты всех приведенных выше вариантов при одинаковой производительности по исходной смеси F , кг/с, одинаковых значения концентрации исходной смеси \bar{x}_F , %, дистиллята \bar{x}_P , %, кубового остатка \bar{x}_W , %. По кривой растворимости [3] определим температуру декантации фаз в отстойнике, обеспечивающую не менее 94% мас. фурфурола в тяжелой фазе. При температуре 30 °С азеотропная смесь расслаивается с содержанием фурфурола в водной фазе 8,8 %, в органической – 94,2 %. Окончательно в качестве исходных данных примем следующие значения: $F = 1,5$ кг/с, $\bar{x}_F = 7\%$, $\bar{x}_P = 94,2\%$, $\bar{x}_W = 0,02\%$.

На рисунке 1 представлена схема процесса ректификации с подачей одной из фаз после отстойника на орошение колонны в качестве флегмы. Энергетические затраты в этом варианте составили: $Q_K = 1143,14$ кВт, $Q_F = 412,92$ кВт, $Q_\Phi = 67,83$ кВт, $Q_D = 953,75$ кВт, $Q_X = 81,87$ кВт, $Q_W = 407,39$ кВт.

Суммарные значения горячей утилиты $Q_H = 1623,89$ кВт, холодной – $Q_C = 1443,02$ кВт.

На рисунке 2 представлена схема ректификационной установки, где одна из фаз после декантации в отстойнике подается в промежуточное сечение укрепляющей части колонны. В этом случае энергозатраты получились следующие: $Q_K = 3171,105$ кВт, $Q_F = 412,92$ кВт, $Q_{q01} = 67,9735$ кВт, $Q_D = 3108,69$ кВт, $Q_X = 81,87$ кВт, $Q_W = 407,39$ кВт.

Суммарные значения горячей утилиты $Q_H = 3733,878$ кВт, холодной – $Q_C = 3592,962$ кВт.

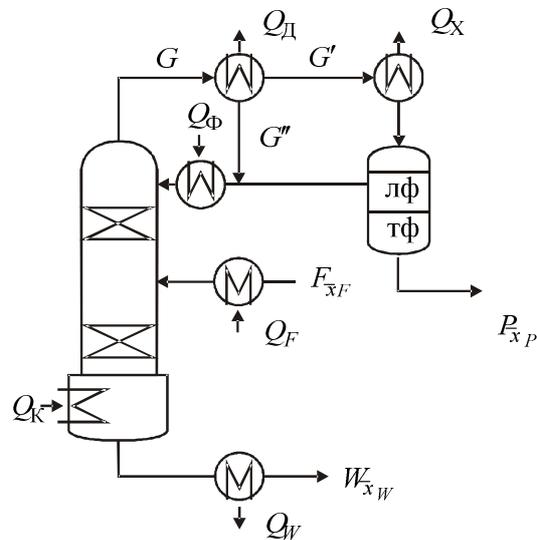


Рисунок 1 – Схема процесса ректификации с подачей одной из фаз после отстойника на орошение колонны в качестве флегмы

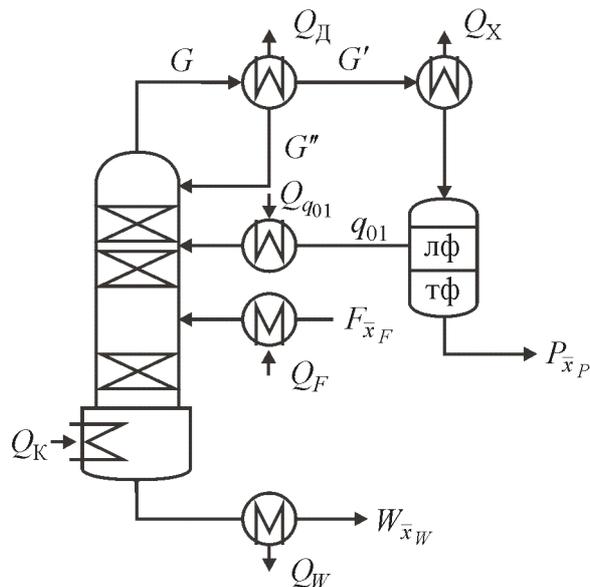


Рисунок 2 – Схема процесса ректификации с подачей одной из фаз после отстойника в промежуточное сечение укрепляющей части колонны

Представленный на рисунке 3 вариант процесса ректификации имеет следующие энергозатраты: $Q_K = 3063,127$ кВт, $Q_{F'} = 477,393$ кВт, $Q_D = 3108,69$ кВт, $Q_X = 81,87$ кВт, $Q_W = 407,39$ кВт.

Суммарные значения горячей утилиты $Q_H = 3540,52$ кВт, холодной – $Q_C = 3597,959$ кВт.

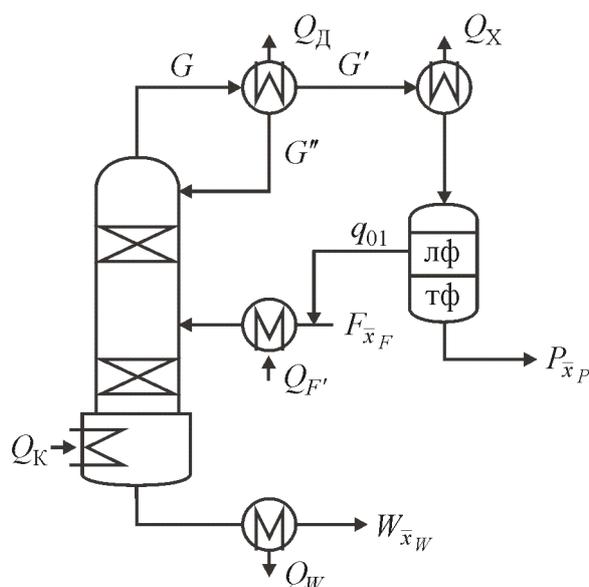


Рисунок 3 – Схема процесса ректификации с подачей одной из фаз после отстойника на питание колонны

Анализ проведенных расчетов показывает, что наименьшие энергозатраты имеет вариант процесса, когда водная фаза после отстойника направляется на орошение колонны в качестве флегмы. Вариант подачи водной фазы после отстойника в промежуточное сечение укрепляющей части колонны и на ее питание имеют практически одинаковые энергозатраты, которые превышают энергозатраты предыдущего варианта более чем в два раза. Во всех трех рассмотренных вариантах процесса бросается в глаза тот факт, что отсутствует рекуперация тепла, в то время как горячие и холодные утилиты имеют близкие значения. В связи с этим для снижения энергозатрат необходимо провести интеграцию тепловых потоков, чтобы достичь максимально возможной рекуперации тепла. Интеграцию тепловых потоков рационально провести, базирываясь на методах пинч-анализа [4], которые позволяют, задавшись экономически оправданным значением минимальной разности температур теплоносителей ΔT_{\min} , получить максимально возможную долю рекуперации тепла.

В таблице 1 представлены данные внешних тепловых потоков для всех трех рассмотренных выше вариантов.

Определение целевых энергетических значений $Q_{H \min}$ и $Q_{C \min}$ провели методом составных кривых и методом табличного алгоритма при $\Delta T_{\min} = 10 \text{ }^\circ\text{C}$. В результате получены следующие значения: для варианта №1 $Q_{H \min} = 90,27 \text{ кВт}$, $Q_{C \min} = 98,79 \text{ кВт}$; для варианта №2 $Q_{H \min} = 61,94 \text{ кВт}$, $Q_{C \min} = 70,32 \text{ кВт}$; для варианта №3 $Q_{H \min} = 62,95 \text{ кВт}$, $Q_{C \min} = 70,29 \text{ кВт}$. Энергозатраты в результате интеграции внешних тепловых потоков сократились по горячим и холодным утилитам для варианта №1 на 24,04 % и 27,06 %, для варианта №2 на 13,41 % и 11,64 %, для варианта №3 на 11,7 % и 11,64 %.

На рисунках 4,5,6 представлены модернизированные схемы ректификационных установок, обеспечивающие максимально возможную рекуперацию энергии внешних тепловых потоков при выбранном $\Delta T_{\min} = 10 \text{ }^\circ\text{C}$.

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ПРОМИСЛОВОГО ОБЛАДНАННЯ

Таблиця 1

№	Поток	Расход, кг/с	$T_H, ^\circ\text{C}$	$T_K, ^\circ\text{C}$	$\Delta T, ^\circ\text{C}$	$C, \text{кДж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$	$\Delta H, \text{кВт}$	$CP, \text{кВт}/^\circ\text{C}$
Вариант №1								
1	G'	0,3618	97,9	30	67,9	3,333	81,879	1,2059
2	W	1,389	100	30	70	4,19	407,394	5,8199
3	F	1,5	30	98,5	68,5	4,0187	412,921	6,0281
4	Φ	0,4695	58,6	97,9	39,3	3,676	67,831	1,726
Вариант №2								
1	G'	0,3618	97,9	30	67,9	3,333	81,879	1,2059
2	W	1,389	100	30	70	4,19	407,394	5,8199
3	F	1,5	30	98,5	68,5	4,0187	412,921	6,0281
4	q	0,2508	30	98,2	68,2	3,974	67,974	0,9967
Вариант №3								
1	G'	0,3618	97,9	30	67,9	3,333	81,879	1,2059
2	W	1,389	100	30	70	4,19	407,394	5,8199
3	F'	1,7508	30	98,6	68,6	4,0126	481,933	7,0253

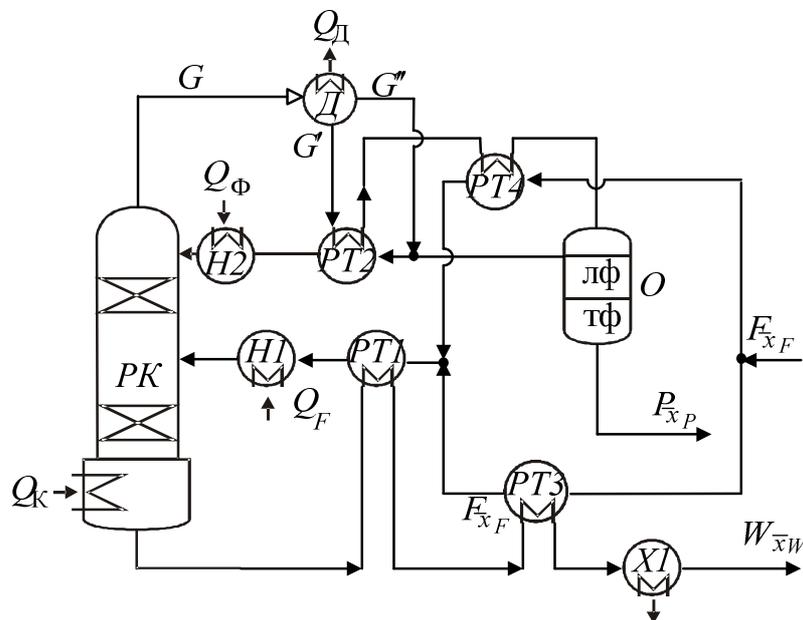


Рисунок 4 – Модернізована схема процесу ректифікації з подачею однієї з фаз після отстойника на зрошення колонни в якості флегми
 РК – ректифікаційна колонна, Д – дефлегматор, Н1-Н2 – підогреватели, Х1 – холодильник, РТ1-РТ4 – рекуперативні теплообмінники, О – отстойник

Выводы

Сравнительная оценка энергозатрат процесса ректификации частично растворимых компонентов смеси фурфурол-вода при различных вариантах питания и орошения колонны позволяет сделать вывод, что наименьшие энергозатраты имеет вариант с подачей водной фазы после отстойника на орошение колонны в качестве флегмы. Дальнейшее сокращение энергозатрат возможно только за счет интеграции внешних тепловых потоков. Интеграция, проведенная методами пинч-анализа, позволила сократить энергозатраты до 27 %.

Литература

1. Гельперин Н.И. Основные процессы и аппараты химической технологии. М.:Химия, 1981, 812 с.
2. Багатуров С.А. Основы теории и расчета перегонки и ректификации. М.:Химия, 1974, 439 с.
3. Коган В.Б., Фридман В.М., Кафаров В.В. Равновесие между жидкостью и паром. Кн. 1 и 2. М.-Л., Наука, 1986, 1426 с.
4. Смит Р., Клемеш Й., Товажнянский Л.Л., Капустенко П.А., Ульев Л.М. Основы интеграции тепловых процессов. Харьков:НТУ«ХПИ», 2000, 457 с.

Bibliography (transliterated)

1. Gel'perin N.I. Osnovnye processy i apparaty himicheskoy tehnologii. M.:Himija, 1981, 812 p.
2. Bagaturov S.A. Osnovy teorii i rascheta peregonki i rektifikacii. M.:Himija, 1974, 439 p.
3. Kogan V.B., Fridman V.M., Kafarov V.V. Ravnovesie mezhdru zhidkost'ju i parom. Kn. 1 i 2. M.-L., Nauka, 1986, 1426 p.
4. Smit R., Klemesh J., Tovazhnjanskij L.L., Kapustenko P.A., Ul'ev L.M. Osno-vy integracii teplovyh processov. Har'kov:NTU»HPI», 2000, 457 p.

УДК 621:664(076)

Гарев А.О., Чернишов І.С., Бабак Т.Г., Балаба Ю.О., Колісник О.А., Сільченко К.О.

ПОРІВНЯЛЬНА ОЦІНКА ЕНЕРГОВИТРАТ РЕКТИФІКАЦІЇ ЧАСТКОВО РОЗЧИННИХ КОМПОНЕНТІВ СУМІШІ ФУРФУРОЛ-ВОДА ПРИ РІЗНИХ СПОСОБАХ ЗРОШЕННЯ Й ЖИВЛЕННЯ КОЛОНИ

Надано порівняльну оцінку енерговитрат процесу ректифікації азеотропної суміші фурфурол-вода при різних способах живлення й зрошення колони. Вирішено задачу оптимальної рекуперації енергії для різних варіантів організації процесу з використанням методів пінч-аналізу.

Garev A.O., Chernyshev I.S., Babak T.G., Balaba Y.O., Kolesnik E.A., Silchenko K.A.

THE COMPARATIVE ESTIMATION OF POWER CONSUMPTION IN FURFURAL-WATER MIXTURE RECTIFICATION FOR VARIOUS KINDS OF FEEDING AND REFLUXING OF A COLUMN

The comparative estimation of power consumption of rectification process was given for various kinds of feeding and refluxing of a column. The problem of optimal energy recovery for various types of the process organization was solved by pinch-analysis methods.

УДК 615.462:66.011

Литвиненко Е.И., Гардер С.Е., Мельник Ю.Я.

ИССЛЕДОВАНИЕ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СВОЙСТВ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Актуальность работы. Технология полимеров, как и других материалов, уже давно идет по пути создания композитов, в которых за счет направленного сочетания компонентов стремятся получить требуемый комплекс свойств. Введение наполнителей в систему позволяет получать полимерные композиционные материалы (ПКМ) с улучшенными физико-механическими свойствами, снижая их стоимость за счет экономии полимерного связующего. Модификация поверхности наполнителя и введение его в ПКМ занимает особое место в технологии получения новых композитов, хотя и связана с дополнительными затратами, однако они оправдываются значительными улучшениями основных эксплуатационных свойств, расширением областей их применения и повышением долговечности.

В качестве наполнителя использовали синтетический цеолит NaA (ТУ 6-18-29-86), который синтезируется из отходов содового производства. В качестве полимерного связующего использовали ПКМ на основе эпоксидно-(мет)-акриловых сополимеров торговой марки «Акрилоксид» (ТУ У 24.4-0048-1318-024-2003).

Цель работы. Исследовать основные эксплуатационные характеристики ПКМ и в рамках единой математической модели установить корреляцию между заданными параметрами.

Для составления моделей были использованы полученные результаты по исследованию основных эксплуатационных свойств (усадка, микротвердость и содержание остаточного мономера). Взаимосвязь между заданными параметрами устанавливали в рамках классической линейной модели множественной регрессии [1,2].

Линейная модель. В данном случае это теоретическая модель вида:

$$\tilde{S} = \theta_0 + \theta_1 \cdot X + \theta_2 \cdot Fp + \theta_3 \cdot M + \theta_4 \cdot t, \quad (1)$$

где S – усадка, %; X – содержание остаточного мономера, %; Fp – микротвердость, МПа; M – содержание наполнителя, масс. ч.; t – время, ч.; $\theta_0, \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_4$ – коэффициенты (параметры) регрессии.

Неизвестные коэффициенты θ_i (θ_0 нужен для учета всех неизвестных факторов, не включенных в модель, например, влажности и т.д.) подлежат определению или статистической оценке. Эту оценку проводили методом наименьших квадратов (МНК) [3,4].

В каждой точке, где проводили измерения параметров, требуется минимизировать сумму квадратов отклонения теоретической кривой (1) от экспериментальных значений:

$$\sum_{i=1}^N (S_i - \theta_0 - \theta_1 \cdot X_i - \theta_2 \cdot Fp_i - \theta_3 \cdot M_i - \theta_4 \cdot t)^2 = F(\theta_0, \theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4) \rightarrow \min. \quad (2)$$

Это приводит к системе так называемых «нормальных уравнений»:

$$\frac{\partial F}{\partial \theta_0} = 0; \quad \frac{\partial F}{\partial \theta_1} = 0; \dots \frac{\partial F}{\partial \theta_p} = 0. \quad (3)$$

Фактически, (3) – это необходимые условия экстремума функции нескольких переменных. Решение задачи записывали в матричном виде. Введем матрицы экспериментальных данных:

$$S = \begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \\ \vdots \\ S_N \end{pmatrix}; \quad A = \begin{pmatrix} 1 & X_1 & Fp_1 & M_1 & t_1 \\ 1 & X_2 & Fp_2 & M_2 & t_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & X_N & Fp_N & M_N & t_N \end{pmatrix}; \quad \theta = \begin{pmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \vdots \\ \theta_p \end{pmatrix}, \quad (4)$$

где N – количество измерений; p – количество параметров θ_i .

В каждой точке i наблюдений должны выполняться уравнения вида (1). В матричном виде это:

$$A \cdot \theta = S. \quad (5)$$

Решение этой системы называют «оценкой коэффициентов» модели (вектор θ) по МНК. Эта оценка имеет следующий вид:

$$\theta = (A^T \cdot A)^{-1} \cdot A^T \cdot S. \quad (6)$$

После оценки коэффициентов исследовали качество построенной модели и ее адекватность экспериментальным данным. Вычисляли:

- стандартную ошибку уравнения множественной регрессии:

$$\sigma^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (S_i - \tilde{S}_i)^2; \quad \sigma = \sqrt{\sigma^2}; \quad (7)$$

- коэффициент детерминации R^2_d :

$$R^2_d = 1 - \frac{D(S)}{\sigma^2}, \quad (8)$$

где $D(S) = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (S_i - \bar{S})^2$ - дисперсия наблюдаемых значений; $\bar{S} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_i$ - среднее значение. В результате реализации получена линейная модель:

$$\tilde{S} - 1,617 - 0,501 \cdot X - 0,003944 \cdot Fp - 6,594 \cdot M - 0,536 \cdot t = 0. \quad (9)$$

Степенная модель. Другой возможным вид простейшей модели – степенная модель вида:

$$\tilde{S} - \theta_0 \cdot X^{\theta_1} \cdot Fp^{\theta_2} \cdot M^{\theta_3} \cdot t^{\theta_4} = 0. \quad (10)$$

При оценке параметров $\theta_0, \theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$ использовали методику получения линейной модели, логарифмировали (10):

$$\ln \tilde{S} = \ln \theta_0 + \theta_1 \cdot \ln X + \theta_2 \cdot \ln Fp + \theta_3 \cdot \ln M + \theta_4 \cdot \ln t. \quad (11)$$

Обозначив $\tilde{s} = \ln \tilde{S}$; $\bar{\theta}_0 = \ln \theta_0$; $\tilde{x} = \ln X$; $\tilde{F} = \ln Fp$; $\tilde{m} = \ln M$; $\tilde{t} = \ln t$, получили линейную модель вида:

$$\tilde{s} = \theta_0 + \theta_1 \cdot \tilde{x} + \theta_2 \cdot \tilde{F} + \theta_3 \cdot \tilde{m} + \theta_4 \cdot \tilde{t}, \quad (12)$$

идентичную (1). Оценку коэффициентов этой модели производили по формулам (2–8). После чего определяли коэффициент $\theta_0 = e^{\bar{\theta}_0}$. В результате реализации описанной методики получили степенную модель:

$$\tilde{S} - 0,681 \cdot X^{1,197} \cdot Fp^{1,258} \cdot M^{0,9} \cdot t^{0,982} = 0. \quad (13)$$

Проведена адекватность модели экспериментальным данным. Полученные расчетные коэффициенты и параметры представлены в таблице 1.

Таблица 1 - Параметры моделей

Математическая модель	Параметры регрессии, θ_i	Стандартная ошибка уравнения регрессии, σ	Коэффициент детерминации, R^2_d
Линейная $\tilde{S} = \theta_0 + \theta_1 \cdot X + \theta_2 \cdot Fp + \theta_3 \cdot M + \theta_4 \cdot t$	$\theta_0 = 1,617$ $\theta_1 = 0,501$ $\theta_2 = 0,0039$ $\theta_3 = 6,594$ $\theta_4 = 0,536$	0,327	0,866
Степенная $\tilde{S} - \theta_0 \cdot X^{\theta_1} \cdot Fp^{\theta_2} \cdot M^{\theta_3} \cdot t^{\theta_4} = 0$	$\theta_0 = 0,681$ $\theta_1 = 1,197$ $\theta_2 = 1,258$ $\theta_3 = 0,900$ $\theta_4 = 0,982$	0,089	0,649

Результаты сравнения моделей по коэффициенту детерминации, позволяют сделать вывод о том, что линейная модель более адекватно описывает экспериментальные данные.

Выводы. Введение наполнителя в ПКМ позволяет улучшить эксплуатационные свойства и значительно снизить себестоимость полученного композита.

Полученные математические модели дают возможность определять неизвестный параметр, а также позволяют прогнозировать свойства полученных ПКМ, что является экономически целесообразным.

Литература

1. Мельник Ю. Я. Цеолітонаповнені полімерні композиції холодного твердження / Ю. Я. Мельник, В. М. Земке, Є. І. Литвиненко // Хімічна промисловість України. – 2009. – № 4. – С. 31-35.
2. Литвиненко Є. І. Технологія одержання наповненого акрилоксиду з покращеними експлуатаційними властивостями / Є. І. Литвиненко, Ю. Я. Мельник, В. М. Земке // Інтегровані технології та енергозбереження. – Х. : НТУ «ХПІ», 2008. – № 4. – С. 63–68.
3. Численные методы в инженерных расчетах / В. Е. Краскевич. – К. : Вища школа. Головное изд-во, 1986. – 263 с.
4. Статистична обробка даних / В. П. Бабак. – К. : МІВВЦ, 2001.– 388 с.

Bibliography (transliterated)

1. Mel'nik Ju. Ja. Ceolitonapovneni polimerni kompozicii holodnogo tverdennja Ju. Ja. Mel'nik, V. M. Zemke, Є. I. Litvinenko Himichna promislovist' Ukraїni. – 2009. – # 4. – p. 31 35.
2. Litvinenko Є. I. Tehnologija oderzhannja napovnenogo akriloksidu z pokrashhenimi ekspluataciijnimi vlastivostjami Є. I. Litvinenko, Ju. Ja. Mel'nik, V. M. Zemke Integrovani tehnologii ta energozberezhennja. – H. : NTU «HPI», 2008. – # 4. – p. 63–68.
3. Chislennye metody v inzhenernyh raschetah / V. E. Kraskevich. – K. : Vishha shkola. Golovnoe izd-vo, 1986. – 263 p.
4. Statistichna obrobka danih V. P. Babak. – K. : MIVVC, 2001.– 388 p.

УДК 615.462:66.011

Литвиненко Є.І., Гардер С.Є., Мельник Ю.Я.

ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ З ВИКОРИСТАННЯМ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

У рамках класичної лінійної моделі множинної регресії на основі експериментальних залежностей були отримані математичні моделі, які пов'язують залежно від ступеню наповнення усадку, мікротвердість, вміст залишкового мономеру ПКМ на основі акрилоксиду і модифікованого синтетичного цеоліту та зміну їх у часі. Отримані математичні моделі дають можливість визначити невідомий параметр, а також прогнозувати властивості отриманих ПКМ.

Lytvynenko E. I., Garder S.E., Melnuk Yu. I.

**INVESTIGATION AND PREDICTING OF POLYMER COMPOSED MATERIALS
PROPERTIES WITH SIMULATION TECHNIQUE**

The mathematical models based on obtained experimental equations were developed according to classical linear model of multiple regression. It gives the possibility to connect depending on filling degree the microhardness, containing of rest monomer PCM based on acryloxide and modified ceolite and changing in time. Resulted models let to define the unknown parameter and to predict the properties of obtained PCM.

УДК 66.011

Бабіченко А.К.

ЗАКОНОМІРНОСТІ ТЕПЛООБМІНУ В ПРОЦЕСІ КОНДЕНСАЦІЇ ПРОДУКЦІЙНОГО АМІАКУ З ЦИРКУЛЯЦІЙНОГО ГАЗУ У ВИПАРНИКАХ АГРЕГАТИВ СИНТЕЗУ

Вступ і постановка задачі досліджень. Найважливішою стадією виробництва аміаку у великотоннажних агрегатах синтезу є вилучення кінцевого продукту шляхом його конденсації при охолодженні циркуляційного газу у двох кожухотрубних з U – подібними теплообмінними трубками випарниках зануреного типу, включених до схеми роботи двох аміачних холодильних установок. Циркуляційний газ з парою аміаку охолоджується у середині трубному просторі до температури згідно регламенту не вище 0 °С за рахунок аміаку, що кипить у між трубному просторі випарників під тиском 0,296 МПа. Газоподібний аміак з міжтрубного простору випарників прямує в холодильні установки, де він скраплюється і подається знову до випарників. Зниження температури охолодження циркуляційного газу, як відомо [1] позитивно впливає не тільки на процес конденсації, але й сприяє зниженню енерговитрат у виробництві аміаку в цілому за рахунок зменшення споживання природного газу і глибоко знесолоної води.

Забезпечення цієї температури на якомого низькому рівні вирішується на стадії проектування випарників, виконання якого вимагає встановлення коефіцієнту теплопередачі K . Важкість визначення величини K пов'язана в основному з встановленням його складової – коефіцієнту тепловіддачі з боку циркуляційного газу, що обумовлено процесом теплообміну при конденсації пари аміаку за наявності великої кількості інертів (аргон, метан, азот, водень) до 90 % об. під підвищеним тиском до 25 МПа. Присутність з парою такої кількості інертів, що не конденсуються, ускладнює доступ пари до поверхні конденсації і призводить, як підтверджено результатами попередніх досліджень [2], до зменшення коефіцієнту теплопередачі у порівнянні з проектною величиною розрахованою з урахуванням формули Краусольда в середньому майже у 1,5 рази. Згідно існуючих теоретичних положень [3] загальний термічний опір з боку циркуляційного газу за наявності інертів є складною функцією, яку можна розділити на термічні опори конденсату R_K і підводу теплоти (пари) до поверхні конденсації (дифузійний термічний опір) R_d . На поверхні стінки у середині труб може утворюватись як плівка конденсату (плівкова конденсація), так і відбуватись її покриття окремими краплями (крапельна конденсація). За високого тиску в охолодженій газовій суміші, як засвідчують дослідження Ларсона-Блека, рідкий аміак знаходиться у вигляді найдрібніших крапель туману, що висуває припущення про протікання крапельної конденсації. Підтвердження такого припущення та визначення рівняння для розрахунку конденсаційної складової $R_K = 1/\alpha_K$ і становило задачу досліджень.

Методика і результати досліджень. В процесі досліджень використовувались експериментальні дані, отримані в умовах промислової експлуатації випарника блоку вторинної конденсації.

Розрахунок величини теплового потоку Φ здійснювався за алгоритмом представленим в роботі [4], а експериментальний коефіцієнт теплопередачі K (Вт/м²К) визначався за формулою:

$$K = \Phi / F \Delta t_{cp}, \quad (1)$$

де $F = 520 \text{ м}^2$ – поверхня теплообміну; Δt_{cp} – середньологарифмічна різниця температур, °С.

Перенос теплоти через шар конденсату, що рухається, визначається конвективним теплообміном, згідно якого формула Краусольда для розрахунку коефіцієнту тепловіддачі може бути представлена у дещо перетвореному наступному вигляді [5]:

$$\alpha_{BH} = 1 / R_d = A W_{TP}^{0,8} d_{BH}^{-0,2}; \quad (2)$$

$$A = 16,28 \frac{\lambda_{II}}{\mu_{II}^{0,8}} \left(\frac{Pr}{0,73} \right)^{0,4}, \quad (3)$$

де λ_{II} – теплопровідність циркуляційного газу, ккал/м·год·град; μ_{II} – динамічна в'язкість циркуляційного газу, кг/м·год; Pr – критерій Прандтля; W_{TP} – вагова швидкість циркуляційного газу у трубному просторі на одиницю поверхні, кг/м²с; $d_{BH} = 0,015 \text{ м}$ – внутрішній діаметр труб.

Коефіцієнт теплопередачі K_{MT} (Вт/м²К) з боку аміаку у зоні розвиненого бульбашкового кипіння на зовнішній поверхні пучків труб в області помірних навантажень розраховувався за достатньо апробованим у практичних умовах рівнянням [6]:

$$K_{MT} = 2,2 q_F^{0,7} p^{0,21}, \quad (4)$$

де q_F – питомий тепловий потік, Вт/м²; p – тиск кипіння, бар.

Середня температура циркуляційного газу t_{CP}^{II} , температури стінки з боку циркуляційного газу t_{CT}^{II} і киплячого холодоагенту t_{CT}^{MT} , температура поверхні конденсату t_{II} та термічний опір конденсату R_K встановлювались за формулами:

$$t_{CP}^{II} = t_{MT} + \Delta t_{CP}; \quad (5)$$

$$t_{CT}^{MT} = t_{MT} + q_F / \alpha_{MT}; \quad (6)$$

$$t_{II} = t_{CP}^{II} - q_F / \alpha_{BH}; \quad (7)$$

$$t_{CT}^{II} = t_{CT}^{MT} + q(R_{CT} + R_3); \quad (8)$$

$$R_K = (t_{II} - t_{CT}^{II}) / q_F, \quad (9)$$

де $(R_{CT} + R_3) = 0,00025664 \text{ м}^2\text{К/Вт}$ – загальний технічний опір стінки труб і забруднень [2].

З урахуванням уведених позначень коефіцієнт теплопередачі визначиться наступним рівнянням:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{MT}} + R_K + R_3 + R_{CT} + \frac{1}{\alpha_{BH}}} \quad (10)$$

Окремі результати експериментальних досліджень та розрахунків зведені до табл. 1. Узагальнення даних пошукових досліджень для середнього коефіцієнту тепловіддачі α_K при крапельній конденсації представлено на рис. 1, обробка яких дозволила встановити функціональну залежність у двох областях умовної швидкості росту конденсованої фази:

$$Nu_K = C\omega_K^{-n}, \quad (11)$$

де $C=1,603$ і $n=0,5783$ для $\omega_K=2\div 0,6$ м/с; $C=0,1417$ і $n=4,2218$ для $\omega_K < 0,6$ м/с

Умовна швидкість ω_K та критерій Нусельта при крапельній конденсації визначаються рівняннями [3]:

$$\omega_K = \lambda_K (t_{CP}^II - t_{CT}^II) / r\rho_K R_{KP}; \quad (12)$$

$$Nu_K = \alpha_K R_{KP} / \lambda_K; \quad (13)$$

$$R_{KP} = 2\sigma_K T_{CP}^II / r\rho_K (t_{CP}^II - t_{CT}^II), \quad (14)$$

де λ_K – теплопровідність конденсату, Вт/м·К; r – теплота конденсації, Дж/кг; ρ_K – густина конденсату, кг/м³; R_{KP} – критичний радіус кривизни поверхні розділу фаз, м; σ_K – поверхневий натяг, Н/м.

Коефіцієнт множинної кореляції для залежності (11) у відповідних областях ω_K склав 0,7 і 0,95, а середня похибка розрахунків α_K не перевищує 12 %.

Аналіз результатів досліджень. Наявність характерного злому у представленій на рис. 1 залежності підтверджує висунуте припущення про протікання крапельної конденсації і пояснюється тим, що швидкість конденсації (умовна швидкість росту конденсованої фази) суттєво лімітується температурним напором $\Delta t = t_{CP}^II - t_{CT}^II$.

За існуючої теорії крапельної конденсації при первинному стисканні пари з поверхнею стінки швидко утворюється тонка плівка, яка набуває особливих властивостей відмінних від властивостей цієї ж рідини удалині від границі розподілу фаз. Товщина цієї плівки неоднакова по поверхні і дорівнює чи менше висоти виступів природної шорсткості теплообмінних труб. За таких умов термічний опір конденсату миттєво зростає. Підвищення швидкості конденсації з ростом Δt і збільшення конденсованої фази призводить до утворення більш товстої (краплі) плівки. По мірі росту краплі безперервно з'єднуються, звільняючи якусь частину поверхні стінки труб. Завдяки багатократно-го злиття і неперервного процесу конденсації краплі збільшуються до відривного розміру, за якого вони утягуються потоком циркуляційного газу. Внаслідок цього і утворюється тумано подібний газовий потік. При цьому термічний опір конденсату у зв'язку з частковим оголенням труб сприяє меншому впливу термічного опору конденсату на процес тепловіддачі. Отже за $\omega_K > 0,6$ м/с відбувається своєрідна криза крапельної конденсації, а інтенсифікуючий вплив швидкості циркуляційного газу обумовлює її прискорення.

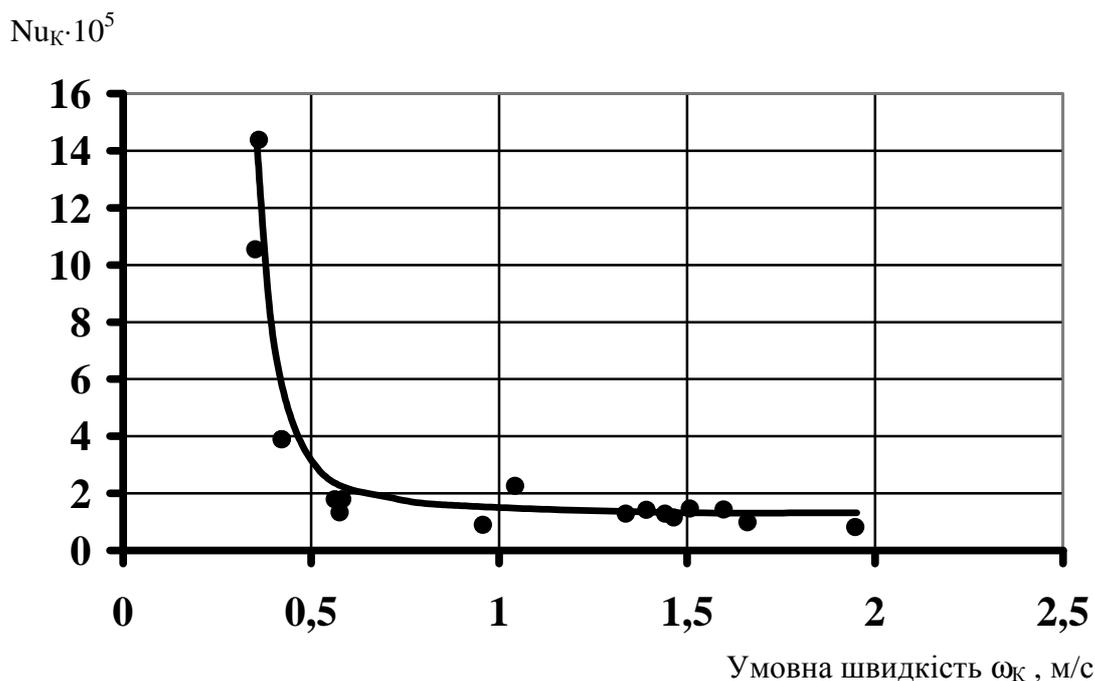


Рисунок 1 – Залежність тепловіддачі при крапельній конденсації від умовної швидкості росту конденсованої фази.

Висновки. Таким чином, за результатами експериментально-аналітичних досліджень промислового випарника блоку вторинної конденсації визначені складові коефіцієнту теплопередачі і, зокрема, термічний опір конденсату. Аналіз отриманих експериментальних даних та літератури дозволив вперше встановити вид конденсаційного процесу, що відбувається та визначити рівняння для розрахунку коефіцієнту тепловіддачі при крапельній конденсації продукційного аміаку за наявності великої кількості інертів. Встановлені гідродинамічні умови кризи крапельної конденсації.

Література

1. Бабиченко А.К. Влияние температуры вторичной конденсации на экономические показатели работы агрегатов синтеза аммиака большой мощности / А.К. Бабиченко, В.Т. Ефимов // Вопросы химии и химической технологии. – 1986. – Вып. 80. – С. 113–117.
2. Бабиченко А.К. Дослідження процесу теплообміну при конденсації аміаку з циркуляційного газу у випарниках великотоннажних агрегатів синтезу / А.К. Бабиченко, В.І. Тошинський, Е.А. Пирсенкова // Інтегровані технології та енергозбереження. – 2008. – № 3. – С. 21–25
3. Исаченко В.П. Теплопередача: учебн. для вузов [В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел]. – М.: Энергия, 1975. – 488 с.
4. В.Т. Ефимов. Повышение эффективности работы абсорбционных холодильных установок в агрегатах синтеза аммиака большой мощности / Ефимов В.Т., Ерошников С.А., Бабиченко А.К. // Холодильная техника. – 1979. – № 2. – С. 23–26.
5. В.М. Рамм. Теплообменные аппараты. – М.: Химия, 1948. – 126 с.

6. Бараненко А.В. Холодильные машины: учебн. для студентов вузов по спец. «Техника и физика низких температур» / [А.В. Бараненко, Н.Х. Бухарин, В.Н. Пекарев и др.]: под.ред. Л.С. Тимофеевского. – СПб.: Политехника, 1997. – 922 с.

Bibliography (transliterated)

1. Babichenko A.K. Vlijanie temperatury vtorichnoj kondensacii na jekonomiche-skie pokazateli raboty agregatov sinteza ammiaka bol'shoj moshhnosti A.K. Babichenko, V.T. Efimov Voprosy himii i himicheskoj tehnologii. – 1986. – Vyp. 80. – p. 113–117.

2. Babichenko A.K. Doslidzhennja procesu teploobminu pri kondensacii amiaku z cirkuljacionogo gazu u viparnikah velikotonnazhnih agregativ sintezu A.K. Babichenko, V.I. Toshins'kij, E.A. Pirsenkova Integrovani tehnologii ta energozberezhennja. – 2008. – # 3. – p. 21–25

3. Isachenko V.P. Teploperedacha: uchebn. dlja vuzov [V.P. Isachenko, V.A. Osipova, A.S. Sukomel]. – M.: Jenergija, 1975. – 488 p.

4. V.T. Efimov. Povysenie jeffektivnosti raboty absorbcionnyh holodil'nyh ustanovok v agregatah sinteza ammiaka bol'shoj moshhnosti / Efimov V.T., Ero-shhenkov S.A., Babichenko A.K. Holodil'naja tehnika. – 1979. – # 2. – p. 23–26.

5. V.M. Ramm. Teploobmennye apparaty. – M.: Himija, 1948. – 126 p.

6. Baranenko A.V. Holodil'nye mashiny: uchebn. dlja studentov vuzov po spec. «Tehnika i fizika nizkih temperatur» [A.V. Baranenko, N.H. Buharin, V.N. Pekarev i dr.]: pod.red. L.S. Timofeevskogo. – SPb.: Politehnika, 1997. – 922 p.

УДК 66.011

Бабиченко А.К.

**ЗАКОНОМЕРНОСТИ ТЕПЛООБМЕНА В ПРОЦЕССЕ КОНДЕНСАЦИИ
ПРОДУКЦИОННОГО АММИАКА ИЗ ЦИРКУЛЯЦИОННОГО ГАЗА
В ИСПАРИТЕЛЯХ АГРЕГАТОВ СИНТЕЗА**

Рассмотрены особенности теплообмена при конденсации продукционного аммиака из циркуляционного газа в испарителях блока вторичной конденсации крупнотоннажных агрегатов синтеза. На основании анализа экспериментальных данных установлен вид протекающей конденсации и уравнения для расчета коэффициента теплоотдачи в разных режимах капельной конденсации.

Babichenko A.K.

**CONFORMITIES TO THE LAW OF HEAT EXCHANGE IN THE PROCESS
OF CONDENSATION OF AMMONIA OF PRODUCTS FROM CIRCULATION GAS
IN VIPARNIKAKH OF AGGREGATES OF SYNTHESIS**

The features of heat exchange during condensation of ammonia from circulation gas in the vaporizers of block of the second condensation of ammonia synthesis aggregates are considered. On the basis of experimental data analysis the type of flowing condensation and

equalization for the calculation of coefficient of heat emission in the different modes of weeping-out were set.

УДК 658.26:665.63:338.45

Товажнянский Л.Л., Ульев Л.М., Мельниковская Л.А., Зулин Б.Д.

ЭКСТРАКЦИЯ ДАННЫХ ДЛЯ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ИНТЕГРИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ПЕРВИЧНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ НЕФТИ НА УСТАНОВКЕ АВТ А12/2

Введение. Сокращение потребления топливно-энергетических ресурсов в промышленности сопряжено с широкомасштабной реализацией современных энергосберегающих технологий, созданием высокоэффективных энерготехнологических комплексов. Хотя этот вопрос далеко не нов для нефтехимической промышленности, в последнее десятилетие добавились два фактора, которые придали особое значение экономии энергии в странах СНГ и вынуждают расширять диапазон используемых для этой цели методов и средств [1].

Во-первых, рост цен на энергию побуждает более экономно использовать энергоресурсы с тем, чтобы уменьшить общие затраты. Более того, все предприятия, спроектированные и построенные во времена низких цен на энергоносители, в настоящее время работают далеко не в оптимальном режиме с точки зрения потребления энергии.

Во-вторых, значительно уменьшились темпы роста производства, а это означает, что уменьшились возможности введения в строй новых заводов и освоения новых технологических процессов, и внимание направляется все больше в сторону повышения эффективности использования существующего оборудования.

Выпуск разнообразной продукции на нефтепереработки зависит во многом от качества сырья – нефти. Но немалую роль в качестве получаемых продуктов играет как выбор технологических процессов переработки, так и качество проведения каждого процесса.

Установки первичной переработки нефти составляют основу всех нефтеперерабатывающих заводов (НПЗ). На них вырабатываются практически все компоненты моторных топлив, смазочных масел, сырья для вторичных процессов и для нефтехимических производств. От работы АВТ (атмосферно-вакуумная трубчатка) зависят выход и качество компонентов топлив и смазочных масел и технико-экономический показатель последующих процессов переработки нефтяного сырья. Проблемам повышения эффективности работы и интенсификации установок АВТ всегда уделялось и уделяется серьезное внимание.

Нефтепереработка и нефтехимия являются энергоемкими производствами, и уровень энергозатрат в значительной степени влияет на себестоимость готовой продукции. В зависимости от глубины переработки нефти, ее состава, ассортимента и качества целевых продуктов, технического уровня оборудования и других факторов расход энергии на собственные нужды нефтеперерабатывающих заводов эквивалентен 6–10 % перерабатываемой нефти [2]. Из общего количества потребляемой энергии 55–65 % приходится на долю технологического топлива, 30–35% – на тепловую и 8–12 % – на электрическую энергию.

Наиболее энергоемкими являются процессы гидрокрекинга, каталитического крекинга и риформинга, коксования, производства масел. Процессы первичной переработки нефти менее энергоемкие, но атмосферно-вакуумной перегонке подвергается вся поступающая на нефтеперерабатывающий завод нефть, и расходуется здесь около 50 % суммарных энергозатрат [3]. Следовательно, снижение расхода энергии в равной

степени важно для всех процессов нефтепереработки. Из нефтехимических производств наиболее энергоемкими являются производства низших олефинов, метанола, водорода, ароматических углеводородов.

На современных зарубежных нефтеперерабатывающих заводах энергетические затраты составляют 3000–3500 МДж или 100–114 кг условного топлива на 1 т перерабатываемой нефти. Приблизительно такие же затраты топлива и на НПЗ стран СНГ, но при значительно меньшей глубине переработки нефти [4]. С увеличением глубины переработки и расширением нефтехимических производств энергетические затраты возрастают, и экономия энергоресурсов приобретает все большее значение. Основными путями повышения конкурентоспособности отечественной нефтепереработки и нефтехимии являются увеличение глубины переработки нефти и существенное снижение энергоемкости всех процессов [5].

Снижение удельного энергопотребления достигается путем модернизации отдельных систем производства, установок и заводов в целом, рационализации и совершенствования производственных операций [6].

Деятельность специалистов нефте- и газодобывающей, а также перерабатывающей промышленности направлена на усовершенствование технологического процесса и получение достоверных предсказаний параметров. Перед инженерами стоит задача нахождения оптимального способа осуществления технологического процесса в сжатые сроки и с минимальной вероятностью допущения ошибок [7]. Кроме того, решения, принимаемые технологами, должны соответствовать поставленным бизнес-целям и в тоже время обеспечивать эффективность, безопасность и рентабельность работы предприятия [8].

В данной работе рассматривается процесс первичной переработки нефти на установке АВТ А12/2 в режиме без использования вакуумного блока установки. На сегодняшний день данная установка является наиболее используемой в современной промышленности [9]. Установка АВТ А12/2 включает в себя стадии обессоливания, обезвоживания, отбензинивания нефти, разделения нефтегазовых смесей на отдельные фракции (рис. 1) [10].

Для экстракции данных технологических потоков в исследуемом процессе, т.е. таких, как расходы, температуры потоков, их теплофизические параметры использовались: регламент установки, данные центральной заводской лаборатории, прямые измерения параметров, а где такие измерения были недоступны – данные использовались данные режимных листов.

Для выполнения материальных балансов установки и уточнения измеренных потоковых данных было выполнено моделирование работы установки АВТ А12/2 в программе HYSYS, которая представляет собой пакет математического обеспечения, предназначенный для моделирования в стационарном режиме, проектирования химико-технологических производств, контроля производительности оборудования, оптимизации и бизнес-планирования в области добычи и переработки углеводородов и нефтехимии [11].

Программный пакет HYSYS построен на основе надёжных и проверенных методов расчёта технологических процессов. Уже более 25 лет HYSYS применяется для моделирования процессов добычи нефти и газа, нефте- и газопереработки. Программа с одинаковым успехом работает в проектных и инжиниринговых фирмах, в проектно-конструкторских отделах заводов, в научно-исследовательских институтах и на заводских установках.

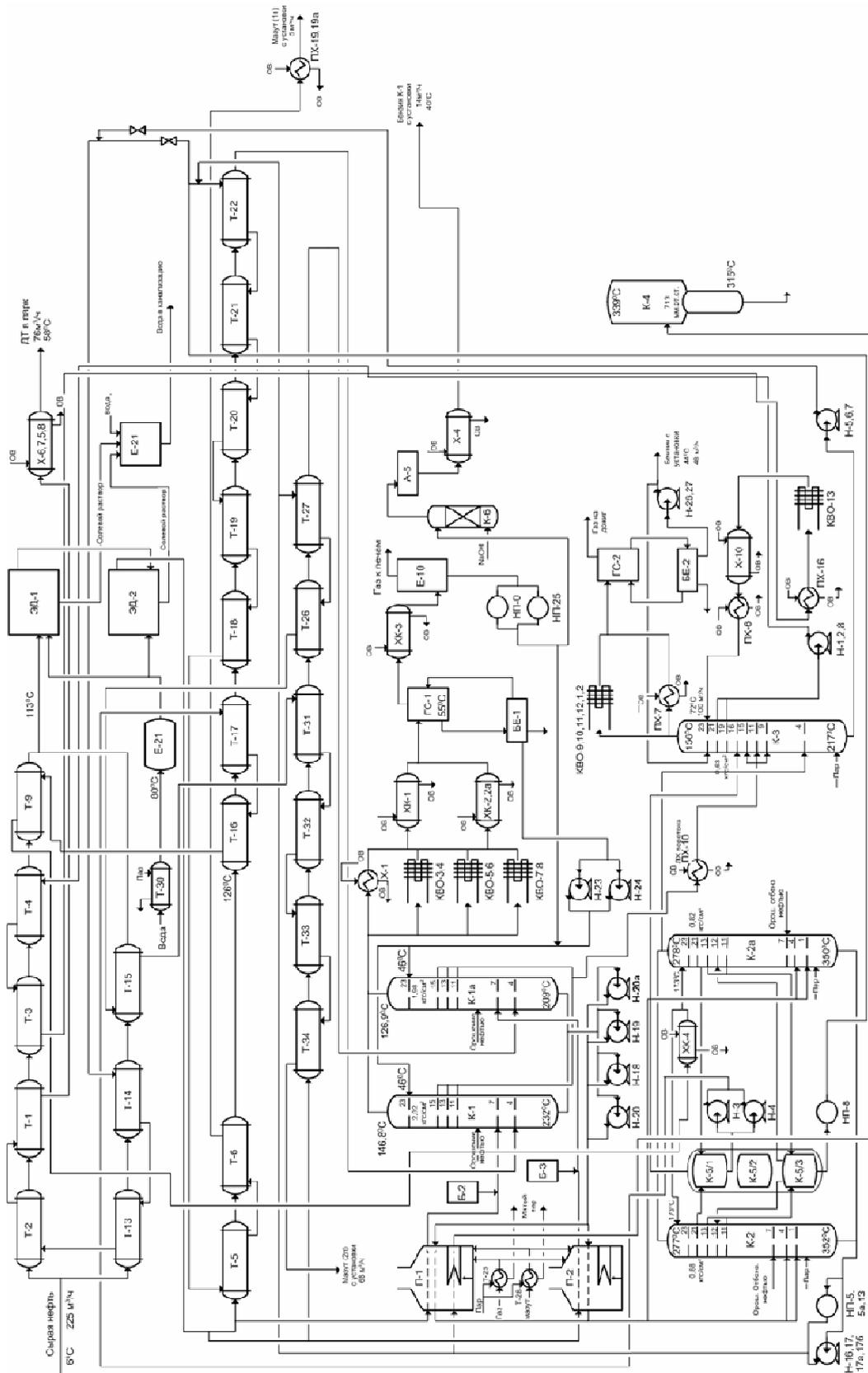


Рисунок 1 – Существующая схема установки переработки нефти АВТ А12/2 без вакуумного блока. БУ, БЕ, Е – емкости; БК – барометрический конденсатор; К1, К1а – атмосферные ректификационные колонны; К2, К2а – ректификационные колонны разгона отбензиновой нефти; К3 – ректификационная колонна для получения дизельного топлива; К4 – вакуумная колонна; К5 – отпарная колонна; КВО – конденсатор воздушного охлаждения; Н, НП – насосы; П – трубчатая печь; Т – теплообменные аппараты; Х, ПХ – холодильники; ХК – конденсаторы; ЭД – электродвигатель; ОВ – охлаждающая вода

На сьогоднішній день інженери і технологи використовують HYSYS як средство построения стационарных моделей при проектировании технологических процессов, для мониторинга состояния оборудования и выявления неисправностей, для оптимизации технологических режимов, бизнес – планирования и управления активами. Кроме того, использование программы HYSYS даёт значительный экономический эффект: повышается производительность и прибыльность установок [12]. Экономический эффект от использования программы HYSYS достигается за счёт оптимизации проектирования – возможности в сжатые сроки оценить рентабельность, безопасность и надёжность установки, мониторинга состояния оборудования – уверенности в том, что оборудование работает в оптимальном режиме, уменьшения затрат на реализацию проекта – возможности свести к минимуму количество ошибок и сделать проект менее трудоёмким. В работах [12–14] продемонстрировано успешное применение программного пакета HYSYS в проектах модернизации румынских нефтеперерабатывающих заводов.

Экстракция данных. Сбор данных, необходимых для расчета материального и теплового балансов, осуществляется путем прямых измерений температур и расходов потоков на оборудовании с помощью расходомеров, стационарных и переносных термометров. В ходе такого обследования установки были получены данные, приведенные ниже.

Сырая нефть. Направляется из сырьевых резервуаров через группу теплообменников на обессоливание. $t_{нач} = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t_{кон} = 118\text{ }^{\circ}\text{C}$, расход – 251 т/ч.

Обессоленная нефть. Направляется из электродегидраторов через группу теплообменников и печи в колонны К-1, К-1а. $t_{нач} = 112\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t_{кон} = 214\text{ }^{\circ}\text{C}$, расход – 248 т/ч.

Переток. Боковой отбор фракций К-1, 1а направляется через холодильник перетока в колонну К-3. $t_{нач} = 173\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t_{кон} = 54\text{ }^{\circ}\text{C}$, расход – 8,2 т/ч.

Бензин К-1,1а. Отбирается с верха колонн К-1, 1а, конденсируется и направляется в парк. Часть бензина идет на орошение колонн К-1, 1а. $t_{нач} = 145\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t_{кон} = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$, расход – 29,69 т/ч.

Газ К-1, 1а. Отделяется от бензина К-1, 1а в газосепараторе, охлаждается в газовом холодильнике. $t_{нач} = 145\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t_{кон} = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$, расход – 3 т/ч.

Отбензиненная нефть. Выходит с низа колонн К-1, 1а, нагревается в печах и поступает в колонны К-2, 2а. $t_{нач} = 214\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t_{кон} = 370\text{ }^{\circ}\text{C}$, расход – 210 т/ч.

Горячая струя К-1, 1а. Выходит с низа колонн К-1, 1а, нагревается в печи и поступает в колонны К-1, 1а. $t_{нач} = 112\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t_{кон} = 350\text{ }^{\circ}\text{C}$, расход – 80 м³/ч.

Пары К-2, 2а. Выходят с верха колонн К-2, 2а и направляются в колонну К-3. $t = 287\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Циркуляционное орошение К-2, 2а. Боковой отбор колонн К-2, 2а охлаждается в теплообменниках и направляется в качестве орошения в К-2, 2а. $t_{нач} = 295\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t_{кон} = 144\text{ }^{\circ}\text{C}$, расход – 31 т/ч.

Мазут. Выходит с низа колонн К-2, 2а, К5/3. Часть мазут охлаждается в теплообменниках и направляется в парк. Другая часть нагревается в печи и подается в колонну К-4. Мазут через теплообменники: $t_{нач} = 360\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t_{кон} = 90\text{ }^{\circ}\text{C}$, расход – 80 т/ч. Мазут в К-4: $t_{нач} = 360\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t_{кон} = 407\text{ }^{\circ}\text{C}$, расход – 73 м³/ч.

Бензин К-3. Отбирается с верха колонны К-3, конденсируется и направляется в парк. Часть бензина идет на орошение колонны К-3. $t_{нач} = 157\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t_{кон} = 46\text{ }^{\circ}\text{C}$, расход – 17,4 т/ч.

Циркуляционное орошение К-3. Боковой отбор колонны К-3, охлаждается в теплообменниках и подается как орошение в К-3. $t_{нач} = 165\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t_{кон} = 74\text{ }^{\circ}\text{C}$, расход – 76 т/ч.

Дизельное топливо. Отбирается с низа колонны К-3, охлаждается в теплообменниках и направляется в парк. $t_{нач} = 229\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t_{кон} = 74\text{ }^{\circ}\text{C}$, расход – 71 т/ч.

Жидкое топливо. Часть мазута подогревается и используется в качестве жидкого топлива печи. $t_{нач} = 49\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t_{кон} = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$, расход – 3,8 т/ч.

Газообразное топливо. Газ колонн К-1, 1а подогревается и направляется в печь в качестве топлива. $t_{нач} = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t_{кон} = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$, расход – 3 т/ч.

Солевой раствор после ЭЛОУ уходит с установки с температурой $t_{нач} = 115\text{ }^{\circ}\text{C}$. расход данного потока составляет величину 15.05 т/ч.

Вода на ЭЛОУ. $t_{нач} = 49\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t_{кон} = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$, расход – 12.54 т/ч.

Промышленная вода. Используется для охлаждения продуктов. $t_{нач} = 24\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t_{кон} = 46\text{ }^{\circ}\text{C}$, расход – 18 т/ч.

Оборотная вода. Используется для конденсации и охлаждения продуктов. $t_{нач} = 18\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t_{кон} = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$, расход – 246 т/ч.

Острый пар. Пар с котельной поступает на перегрев в печь и подается в колонны К-2, 2а, К-3. $t_{нач} = 35\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t_{кон} = 450\text{ }^{\circ}\text{C}$, расход – 1,05 т/ч.

Пар. Используется для нагрева топлива печи и воды, поступающей на ЭЛОУ. $t = 135\text{ }^{\circ}\text{C}$, $p = 4\text{ атм}$.

Заметим, что не все потоки, которые включаются в расчет материального баланса установки, могут быть использованы для выполнения теплоэнергетической интеграции процесса. Последние четыре потока из приведенного списка являются утилитными потоками, и после выполнения проекта интеграции их характеристики, наверняка будут изменены в сторону удешевления использующихся утилит. Значения параметров технологических определяются исследуемым процессом и являются строго заданными.

Моделирование процесса. Отбензиненая нефть с низа К-1, 1а с температурой 200–250 °С подается в змеевики печей П-1, 2. С верха колонны К-2, 2а по трубам выводится хвостовая фракция бензина и дизельного топлива в паровой фазе и поступает в колонну К-3 в качестве перетока, как потока питания. Фракция дистиллятного бензина К-2а и дизельного топлива поступает в верхнюю секцию отпарной колонны К-5/1, откуда через теплообменники возвращается в К-2, К-2а. Пары из стриппинга К-5/1 поступают в К-3 на 16 тарелку. С 11, 13 тарелок К-2 и 9, 11, 13 тарелок К-2а может выводиться атмосферный газойль, который поступает в стриппинг отпарной колонны К-5/3, откуда забирается паровым насосом и откачивается к потоку дизельного топлива или мазута для орошения теплообменников. Пары из стриппинга К-5/3 поступают в К-2, 2а. Сверху К-3 отгоняется хвостовая часть бензина. Пары бензина по шлемовым трубам поступают в конденсаторы, где происходит охлаждение и конденсация, газосепаратор, в котором производится очистка бензина от примесей и воды, а затем направляется в буферную емкость. Дизельное топливо с низа К-3 прокачивается через теплообменники и направляется в парк. Мазут с низа колонн К-2, 2а и К-5/1, 2, 3 используется для оро-

шення теплообменников, необхідних для підогрева вихідної суміші, а також підвищення температури обессоленої і обезвоженої нафти перед подачею в якості потоку живлення в ректифікаційні колонни К-1 і К-1а.

Для уточнення даних про температури і витрати потоків, отриманих шляхом прямих вимірювань, проведено моделювання існуючого процесу переробки нафти на установці АВТ А12/2 з допомогою програми HYSYS. Це дозволить отримати максимально точні дані про складі потоків, мольних і масових витратах, температурах. Крім того, моделювання процесу в HYSYS значно спростить складання матеріального і теплового балансу, а також надасть більш точні дані про кількість необхідних гарячих і холодних утиліт.

В даному випадку буде розглядатися процес переробки нафти після обессолювання і обезвожування сирової нафти в електродегідраторах, після попереднього підогреву в мережі теплообмінників.

Першим етапом стало задання матеріального потоку обессоленої і обезвоженої нафти з детальною характеристикою нафтяної суміші, її газової частини, кривих розгонки, молекулярних мас, щільності, в'язкості і розбивки на псевдокомпоненти. Матеріальні потоки, необхідні для розрахунку матеріального балансу установки, позначені темними стрілками. Світлими стрілками представлені енергетичні потоки, з допомогою яких можливо отримати детальну інформацію про кількість гарячих і холодних утиліт, необхідних для виконання процесу переробки нафти. Значення енергетичних потоків дозволяють більш точно скласти тепловий баланс установки. Далі, відповідно до встановленої при дослідженні енерготехнологічної схеми установки АВТ А12/2, було встановлено відповідне обладнання, як показано на малюнку 2. Печі тут представлені в вигляді нагрівачів з відповідною навантаженням для кожного потоку.

Матеріальний баланс. Для того щоб правильно врахувати при тепловій інтеграції процесу внутрішні технологічні потоки, т.е. ті потоки, які не покидають установку, необхідно розглянути матеріальні баланси ректифікаційних колонн. Розрахунок балансу колонн, отриманий з допомогою програми HYSYS, показаний в таблицях 1 і 2.

Таблиця 1 – Потоки живлення колонн установки АВТ А12/2

Колонна	Поток живлення	Кількість, кг/ч	Температура, °С
Колонна К-1, 1а	Обессол. нафта	250850	214
Колонна К-2, 2а	Отбенз. нафта	210000	214
	Пар	600	450
Колонна К-3	Пари верху К-2, 2а	81310	287
	Переток	8200	54
	Пар	450	450

Таблица 2 – Продуктовые потоки установки АВТ А12/2

Колонна	Продуктовый поток	Количество, кг/ч	Температура, °С
Колонна К-1, 1а	Бензин К-1, 1а	29700	145
	Газ К-1, 1а	2780	145
	Переток	8200	173
	Отбенз. нефть	210000	214
Колонна К-2, 2а	Пары верха К-2, 2а	81310	287
	Мазут	129290	360
Колонна К-3	Бензин К-3	17800	157
	Водяные пары	1049	157
	Дизельное топливо	71110	229

На основании расчета технологических потоков колонн составлен общий материальный баланс колонн (табл. 3).

Таблица 3 – Материальный баланс ректификационных колонн установки АВТ А12/2

Ректификационная колонна	Приход, кг/час	Расход, кг/час
К-1, 1а	250850	250850
К-2, 2а	210620	210620
К-3	89960	89959

Тепловой баланс. При расчете теплового баланса установки мы использовали результаты измерения параметров технологических потоков процесса, данные обследования систем холодных и горячих утилит, т.е. системы водоснабжения, системы паровых магистралей установки и ее печей.

Расчет материального и теплового балансов необходимо выполнять для проверки адекватности данных технологических потоков включенных в тепловую интеграцию. Утилитная система установки АВТ 12/2 состоит из двух трубчатых печей. Полезная тепловая нагрузка определялась по данным измерений продуктовых потоков в трубчатых печах установки (табл. 4, табл. 5).

Общая полезная нагрузка первой печи 20875 кВт. Общая полезная нагрузка второй печи 29116 кВт. Следовательно, общая полезная нагрузка печей, т.е. тепловая энергия, которая в печи потребляется нагреваемыми потоками, равна ~50 МВт.

Измерение параметров отходящих газов и тепловых потерь через поверхности печей дало значение мощности общих тепловых потерь в печах установки, которое составляет величину ~ 30 МВт. Это значит, что общая мощность, выделяемая при сгорании топлива в печи, равна ~80 МВт.

Таблица 4 – Определение полезной нагрузки первой печи

Поток	t_s , °C	t_r , °C	м ³ /ч	кг/м ³	кг/с	Тепло- ем. на входе	Тепло- ем. на выходе	Нагруз- ка
Атмосферный змеевик атмо- сферной части печи	214	371	73	724	14,6 8	2,611	3,187	9155,5
Верхний подог- реватель	214	353	35	724	7,04	2,611	2,984	3481,4
Атмосферный змеевик вакуум- ной части печи	214	310	34	724	6,88	2,611	2,833	2184,5
Нижний подог- реватель	112	203	35	795	7,72	2,237	2,57	2095,9
Вакуумный змеевик вакуум- ной части печи	360	407	73	742	15,0	3,008	3,173	3137,6
Пар	135	450			0,29	568	3379	819,9

Таблица 5 – Определение полезной нагрузки второй печи

Поток	t_s , °C	t_r , °C	м ³ /ч	кг/м ³	кг/с	Теплоем. на входе	Теплоем. на выходе	Нагрузка кВт
Правый	214	370	90	724	18,1	2,611	3,183	11203,1
Левый	214	370	88	724	17,69	2,611	3,183	10954,2
Верхний по- догреватель	214	351	45	724	9,05	2,611	2,833	3942,4
Нижний по- догреватель	112	207	48	795	10,6	2,237	2,585	3016,2

В дальнейшем при выполнении теплоэнергетической интеграции нас в основном будет интересовать значение полезной нагрузки печей, и только для анализа пинч-проекта реконструкции системы рекуперации тепловой энергии, нам понадобится общая мощность печей установки.

Был также проверен общий материальный баланс между потоками, входящими на установку и выходящими из нее.

На основе данных, полученных с помощью измерений, и уточненных с помощью моделирования процесса переработки нефти на установке АВТ А12/2 в программе HYSYS, составлена потоковая таблица для исследуемого технологического процесса (табл. 6).

Потоковая таблица данных является цифровым образом процесса и служит основой для проведения пинч-анализа и теплоэнергетической интеграции процесса [15].

Таблиця 6 – Поточкові дані технологічних потоків, включених в інтеграцію для режиму роботи АВТ А12/2 без вакуумного блоку в зимнє время

№	Назва потоку	Тип	$t_s, ^\circ\text{C}$	$t_T, ^\circ\text{C}$	G, т/ч	$c, \text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$	$r, \text{кДж}/\text{кг}$	CP, кВт/К	$\Delta H, \text{кВт}$	$\alpha, \text{кВт}/(\text{м}^2\cdot\text{K})$
1	Переток К-1,1а в К-3	гор	173	54	8,20	2,11		4,81	571,93	0,4
2,1	Охлаждение паров бензина К-1, 1а	гор	145	50	29,69	2,52		20,78	1974,36	0,1
2,2	Охлаждение газа из К-1, 1а	гор	145	40	2,78	2,52		1,95	204,33	0,1
2,3	Конденсация паров бензина К-1, 1а	гор	50	50	29,69		75		618,53	1
2,4	Охлаждение бензина К-1, 1а	гор	50	40	29,69	2,11		17,40	174,01	0,4
3,1	Охлаждение паров бензина К-3	гор	157	46	17,40	2,52		12,18	1351,98	0,1
3,2	Конденсация паров бензина К-3	гор	46	46	17,40		75		362,50	1
3,3	Охлаждение водяных паров К-3	гор	157	100	1,05	2,00		0,58	32,96	0,12
3,4	Конденсация водяных паров К-3	гор	100	100	1,05		2256		658,00	2
3,5	Охлаждение воды К-3	гор	100	46	1,05	4,19		1,22	65,99	0,8
4	Дизельное топливо	гор	229	200	71,11	2,70		68,29	1980,27	0,2
		гор	200	100	71,11	2,42		58,81	5880,67	0,2
		гор	100	58	71,11	2,10		51,76	2174,05	0,2
5	Циркуляционное орошение К-3	гор	165	74	75,79	2,11		55,87	5083,79	0,15
6	Циркуляционное орошение К-2,2а	гор	295	144	30,73	2,11		29,85	4507,90	0,15
7	Мазут	гор	360	300	133,08	2,90		150,01	9000,85	0,15
		гор	300	250	133,1	2,71		135,78	6789,08	0,15
		гор	250	200	133,1	2,54		122,99	6149,54	0,15
		гор	200	150	133,1	2,36		109,87	5493,37	0,15
		гор	150	90	133,1	2,17		95,69	5741,42	0,15
8	Солевой р-р с ЭЛОУ	гор	115	40	15,05	4,21		17,14	1285,61	0,8
9	Сырая нефть	хол	10	50	250,85	1,95		142,55	5701,96	0,1
		хол	50	118	250,85	2,10		170,22	11574,78	0,1
10	Обессоленная нефть	хол	112	150	248,34	2,28		192,17	7302,34	0,15
		хол	150	200	248,34	2,47		214,40	10720,07	0,15
		хол	200	214	248,34	2,65		231,36	3239,06	0,15
11	Отбензиненная нефть в АЗАЧП П-1	хол	214	250	56,00	2,75		54,87	1975,49	0,15
		хол	250	300	56,00	2,84		59,75	2987,44	
		хол	300	371	56,00	3,18		66,73	4737,86	
	Отбензиненная нефть в АЗВЧП П-1	хол	214	250	26,00	2,75		25,48	917,19	0,15
		хол	250	300	26,00	2,84		27,74	1387,03	
		хол	300	310	26,00	2,97		29,42	294,16	
12	Отбензиненная нефть в ЛЗ П-2	хол	214	250	64,00	2,75		62,71	2257,71	0,15
		хол	250	300	64,00	2,84		68,28	3414,22	
		хол	300	370	64,00	3,18		76,17	5331,73	
	Отбензиненная нефть в ПЗ П-2	хол	214	250	64,00	2,75		62,71	2257,71	0,15
		хол	250	300	64,00	2,84		68,28	3414,22	
		хол	300	370	64,00	3,18		76,17	5331,73	
13	Мазут через ВЗВЧП П-1	хол	360	407	53,29	2,90		65,68	3086,84	0,15
14	Вода на ЭЛОУ	хол	10	80	12,54	4,20		14,60	1021,87	0,8
15	Перегрев пара в П-1	хол	135	450	1,05	2,69		2,60	819,88	0,6
16	Газ к печам	хол	31	80	3,00	2,52		2,10	102,90	0,1
17	Мазут в печи	хол	49	80	3,79	2,05		2,32	71,80	0,1

Выводы. Моделирование процесса первичной переработки нефти на установке АВТ А12/2 с помощью программного продукта HYSYS позволило уточнить измеренные потоковые данные и получить недостающие. Наглядно представлена энерготехнологическая схема процесса, а использование термодинамических моделей HYSYS позволило рассчитать физические свойства, транспортные свойства, фазовое равновесие материальных потоков с высокой точностью. Это дало возможность составить таблицу потоковых данных, которая является цифровым образом процесса и в дальнейшем будет служить основой для интеграции существующего процесса переработки нефти, построения составных кривых и расчета энергоэффективности установки. Кроме того, наличие энергетических потоков позволило точно составить тепловой баланс установки и наглядно представило количество потребляемых горячих и холодных утилит.

Обозначения. c – удельная теплоемкость, Дж/(кг·°C); CP – потоковая теплоемкость (водный эквивалент), Вт/°C; G – массовый расход, кг/с; H – потоковое теплосодержание, Вт; r – скрытая теплота фазового перехода Дж/кг; t – температура, °C; $t_{нач}$ – температура начальная, °C; $t_{кон}$ – температура конечная, °C; t_S – температура снабжения, °C; t_T – целевая температура, °C; α – характерный коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·°C); АВТ – атмосферно-вакуумная трубчатка (установка первичной переработки нефти); АЗАЧП – атмосферный змеевик атмосферной части печи; АЗВЧП – атмосферный змеевик вакуумной части печи; ВЗВЧП – вакуумный змеевик вакуумной части печи; ГС – газосепаратор; ДТ – дизельное топливо; ЛЗ – левый змеевик; ПЗ – правый змеевик; К-1, К-1а – атмосферные ректификационные колонны; К-2, К-2а – ректификационные колонны разгонки отбензиненной нефти; К-3 – ректификационная колонна получения дизельного топлива; К-4 – вакуумная колонна; К-5 – отпарная колонна; ВО – конденсатор воздушного охлаждения; Н – насос; НП – паровой насос; ОВ – охлаждающая вода; П – трубчатая печь; Т-1–Т-34 – теплообменные аппараты; ПХ – погружной холодильник; Х – холодильник; ХК – холодильник-конденсатор; ЭД – электродегидратор; ЭЛОУ – электрообессоливающая установка.

Литература

1. Степанов А.В. Рациональное использование сырьевых и энергетических ресурсов при переработке углеводородов / А.В. Степанов, Н.И. Сульжик, В.С. Горюнов. – Киев: Техника. 1989. – 170 с.
2. Клименко В.Л. Энергоресурсы нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности / В.Л. Клименко, Ю.В. Костерин. Л.: Химия. 1985. – 256 с.
3. Гуревич И.Л. Технология переработки нефти и газа. Общие свойства и первичные методы переработки нефти и газа / И.Л. Гуревич. М.: Химия. 1972. – 460 с.
4. Уильям Д. Леффлер. Переработка нефти / Уильям Д. Леффлер. М.: ЗАО «Олимп-Бизнес». 2004. – 223 с.
5. Рудин М.Г. Карманный справочник нефтепереработчика / М.Г. Рудин. Л.: Химия. 1989. – 464 с.
6. Дец М.М. Заходи щодо підвищення ефективності і конкурентоздатності української нафтопереробки / М.М. Дец // Нафтова і газова промисловість. – 1997. – №5. – С.42–44.
7. Скляр В.Т. Необходимость и условия развития нефтеперерабатывающей промышленности Украины / В.Т. Скляр, А.В. Степанов, П.И. Ковальчак // Экотехнологии и ресурсосбережение. – 1996. – №3. – С. 65–69.

8. Т. Нацуо. Многоотраслевой комплекс объединяет нефтепереработку с энергетической и строительной промышленностью / Т. Нацуо, Т. Яаги // Нефтегазовые технологии. – 2004. – №3. – С. 79–82.
9. Багиров И.Т. Современные установки первичной переработки нефти / И.Т. Багиров. М.: Химия. 1974. – 240 с.
10. Эмирджанов Р.Т. Основы технологических расчетов в нефтепереработке и нефтехимии / Р.Т. Эмирджанов, Р.А. Лемберанский. – М.: Химия, 1989. – 191 с.
11. Левченко Д.Н. Технология обессоливания нефтей на нефтеперерабатывающих предприятиях / Д.Н. Левченко. – М.: Химия, 1985. – 186 с.
12. Plesu V. Retrofit solutions in crude distillation plant using process simulation and process integration / Plesu V., Bumbac G., Tacu-Marcov C., Ivanescu I., Popescu D.C.// Chemical engineering transactions, 2005. Vol. 7. P. 169–174.
13. Plesu V. HEN retrofit for a crude distillation unit-part 1 / Plesu V., Bumbac G., Nan O.// Chemical engineering transactions, 2001. Vol. 2. P. 95–98.
14. Plesu V. Catalytic, reforming plant simulation for energy saving and rational use of hydrogen / Plesu V., Baetens D., Bumbac G.// Chemical engineering transactions, 2001. Vol. 2. P. 489–492.
15. Смит Р. Основы интеграции тепловых процессов / Р. Смит, Й. Клемеш, Л.Л. Товажнянский, П.А. Капустенко, Л.М. Ульев – Харьков: Издательский центр НТУ «ХПИ», 2000. – 457 с.

Bibliography (transliterated)

1. Stepanov A.V. Racional'noe ispol'zovanie syr'evykh i jenergeticheskikh resursov pri pererabotke uglevodorodov A.V. Stepanov, N.I. Sul'zhik, V.S. Gorjunov. – Kiev: Tehnika. 1989. – 170 p.
2. Klimenko V.L. Jenergoresursy neftepererabatyvajushhej i neftehimicheskoj promyshlennosti V.L. Klimenko, Ju.V. Kosterin. L.: Himija. 1985. – 256 p.
3. Gurevich I.L. Tehnologija pererabotki nefiti i gaza. Obshhie svojstva i per-vichnye metody pererabotki nefiti i gaza I.L. Gurevich. M.: Himija. 1972. – 460 p.
4. Uil'jam D. Leffler. Pererabotka nefiti Uil'jam D. Leffler. M.: ZAO «Olimp-Biznes». 2004. – 223 p.
5. Rudin M.G. Karmannyj spravocnik neftepererabotchika M.G. Rudin. L.: Himija. 1989. – 464 p.
6. Dec M.M. Zahodi shhodo pidvishhennja efektyvnosti i konkurentozdatnosti ukraïns'koï naftererobki M.M. Dec Naftova i gazova promislovist'. – 1997. – #5. – p.42–44.
7. Skljar V.T. Neobhodimost' i uslovija razvitija neftepererabatyvajushhej promyshlennosti Ukrainy V.T. Skljar, A.V. Stepanov, P.I. Koval'chak Jekotehnologii i resursoberezenie. – 1996. – #3. – p. 65–69.
8. Т. Nacuo. Mnogootraslevoj kompleks ob"edinjaet neftepererabotku s jenergeticheskoj i stroitel'noj promyshlennost'ju T. Nacuo, T. Jagi Neftgazovye tehnologii. – 2004. – #3. – p. 79–82.
9. Bagirov I.T. Sovremennye ustanovki pervichnoj pererabotki nefiti I.T. Bagirov. M.: Himija. 1974. – 240 p.
10. Jemirdzhanov R.T. Osnovy tehnologicheskikh raschetov v neftepererabotke i neftehimii R.T. Jemirdzhanov, R.A. Lemberanskij. – М.: Himija, 1989. – 191 p.
11. Levchenko D.N. Tehnologija obessolivaniya neftej na neftepererabatyvaju-shhikh predpriyatijah D.N. Levchenko. – М.: Himija, 1985. – 186 p.

12. Plesu V. Retrofit solutions in crude distillation plant using process simulation and process integration Plesu V., Bumbac G., Tacu-Marcov C., Ivanescu I., Popescu D.C. Chemical engineering transactions, 2005. Vol. 7. P. 169–174.

13. Plesu V. HEN retrofit for a crude distillation unit-part 1 /Plesu V., Bumbac G., Nan O. Chemical engineering transactions, 2001. Vol. 2. P. 95–98.

14. Plesu V. Catalytic, reforming plant simulation for energy saving and rational use of hydrogen Plesu V., Baetens D., Bumbac G. Chemical engineering transactions, 2001. Vol. 2. P. 489–492.

15. Smit R. Osnovy integracii teplovyh processov R. Smit, J. Klemesh, L.L. Tovazhnjanskij, P.A. Kapustenko, L.M. Ul'ev – Har'kov: Izdatel'skij centr NTU «NPI», 2000. – 457 p.

УДК 658.26:665.63:338.45

Товажнянський Л.Л., Ульєв Л.М., Мельніковська Л.О., Зулін Б.Д.

ЕКСТРАКЦІЯ ДАНИХ ДЛЯ ТЕПЛОЕНЕРГЕТИЧНОЇ ІНТЕГРАЦІЇ ПРОЦЕСУ ПЕРВИННОЇ ПЕРЕРОБКИ НАФТИ НА УСТАНОВЦІ АВТ А12/2

Моделювання процесу первинної переробки нафти на установці АВТ А12/2 за допомогою програмного продукту HYSYS дозволило уточнити зміряні потокові дані і ті, що не дістають. Наочно представлено енерготехнологічну схему процесу, а використання термодинамічних моделей HYSYS дозволило розрахувати фізичні властивості, транспортні властивості, фазову рівновагу матеріальних потоків з високою точністю. Це дало можливість скласти таблицю поточкових даних, яка є цифровим образом процесу і надалі служитиме основою для інтеграції існуючого процесу переробки нафти, побудови складених кривих і розрахунку енергоефективності установки. Крім того, наявність енергетичних потоків дозволила точно скласти тепловий баланс установки і наочно представило кількість споживаних гарячих та холодних утиліт.

Tovazshniansky L.L., Ulyev L.V., Melnikovska L.O., Zulin B.D.

DATA EXTRACTION FOR HEAT ENERGY INTEGRATION OF PROCESS OF AVDU A12/2 CRUDE DISTILLATION UNIT

Simulation of crude distillation process of AVDU A12/2 unit with the help of HYSYS program allow us to specify measured stream data and to receive missing data. Accessible flowsheet was obtained. Thermodynamic HYSYS model use allow us to calculate physical and transfer properties, phase equilibrium of product flows with the big accuracy. This gave capability us to form stream data table which is numerical image of process. This table will be base for existent process integration and for composite curves building, and for unit energy efficiency calculation. HYSYS model allow us to receive a visual image of hot and cold utilities.

УДК 661.225:53.082.52

Гринь Г.І., Панчева Г.М., Козуб П.А., Охремчук Є.В., Лавренко А.О.

ФОТОЕЛЕКТРИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЕЛЕМЕНТІВ НА ОСНОВІ СУЛЬФІДУ КАДМІЮ

Сьогодні сонячна енергія одержала визнання в якості ведучого альтернативного джерела енергії XXI сторіччя, так як планета Земля отримує в 6000 разів більше сонячного світла, ніж людство може спожити. Тому аналітики прогнозують, що доля сонячної енергетики в світовому виробництві енергії збільшиться з 0,3 до 15 % на протязі наступних п'яти років [1].

Використання фотоелектричних установок у всьому світі дозволяє запобігти викиду в навколишнє середовище біля 8 мільйонів тон CO₂ на рік. Фотоенергетика використовує на 98 % менше води на вироблений МВт, ніж найефективніші установки генерації енергії, які працюють на природному газі.

Завдяки цьому, а також низьким виробничим затратам і постійному розвитку технологій з енергозбереження, доля тонкоплівкових фотоелектричних систем збільшилася на загальному фотоелектричному ринку за два останні роки з 9 до 15 % і за прогнозами у 2015 року досягне 30 % [2]. Державна підтримка розвитку відновлювальної енергетики в цілому, і сонячної зокрема, в усьому світі, в тому числі країнах ЄС, створюють привабливі перспективи для розробки фотоелектричних модулів.

Характеристика стану проблеми. У 2008 році швидких темпів росту виробництва фотоелектричних (ФЕ) систем (в 3 рази) досягли такі країни як Японія та Іспанія, які посіли друге і третє місце на ринку фотоенергетики. США знаходилися на четвертому місці, а лідирувала стосовно встановлених PV-потужностей Німеччина. Енергетичну політику в Італії, Австралії, Південній Кореї, Франції, Індії, Португалії та Ізраїлі стимулюють схожі тенденції.

У той же час в Україні на сьогодні експлуатується лише 80 установок сумарною площею 15 тис. м². Найбільша кількість сонячних установок для використання сонячної енергії працює в АР Крим, Київській, Одеській, Львівській та Херсонській областях, але серед них переважають гелеоколектори.

Домінуючу роль (більш 80 %) на ринку фотоелементів займають ФЕ системи на основі кремнію, недоліком яких завжди була вартість кремнію високої очистки. Для зниження вартості кремнієвих модулів, за рахунок більш низького коефіцієнта ефективності перетворення, кристалічний кремній замінюють аморфним кремнієм, телуридом кадмію, діселенідом міді, індія, галія, сульфідом кадмію та ін. Ці напівпровідникові матеріали дешевші і виконують ту ж роботу, але в літературі недостатньо наведено даних щодо фотоелектричних характеристик плівок [3, 4]. Тому **мета дослідження** полягала у вивченні напівпровідникових параметрів плівок CdS, технологія отримання яких є найпростішою і тому собівартість виготовлених фотоелементів є найменшою.

Методика досліджень. Для контролю напівпровідникових параметрів плівок CdS використано метод вольт-амперних характеристик, оптичну спектроскопію. Фотоелектричні характеристики синтезованих плівок CdS досліджували на лабораторній установці (рис. 1), яка складалась з джерела випромінювання, фотоелектрохімічної комірки, в якій розміщували досліджуваний зразок, та приладу реєстрації сигналу (універсальний вольтметр ЦЗ01-1).

Для виявлення напівпровідникових властивостей плівок CdS було створено ге-

тероконтакти та досліджені їхні властивості. В усіх випадках пасивні плівки ідентифікувалися як CdS, а їх напівпровідникові властивості були підтверджені на основі аналізу вольт-амперних характеристик. Здійснювали вимірювання напруги холостого ходу (U_{xx}) та струму короткого замикання ($I_{кз}$). В усіх досліджуваних зразках був виявлений фотоелектрофет.

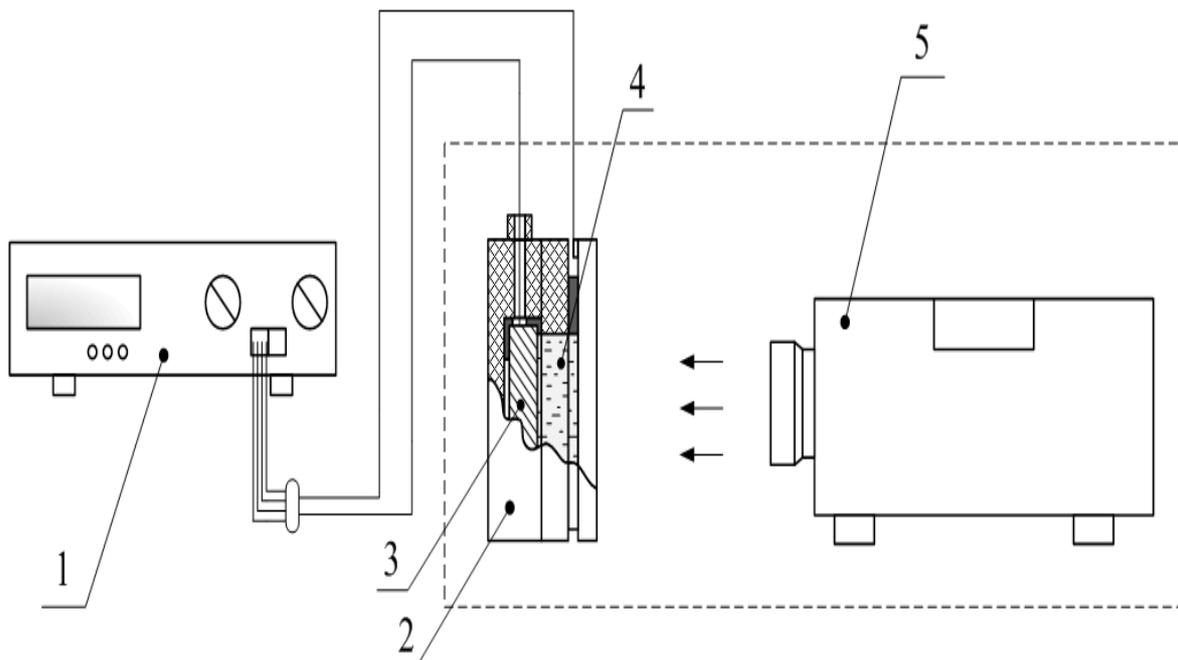


Рисунок 1 – Схема установки вимірювання електрофізичних параметрів CdS:
 1 – універсальний вольтамперметр; 2 – фотоелектрохімічна комірка;
 3 – зразок (Cd-CdS); 4 – електроліт; 5 – джерело світла

Формування тонких плівок CdS здійснювали на прямокутних зразках, які склалися зі скляної підкладки та нанесеного на її поверхню тонкого шару Ti [5]. Після сульфидування зразків і промивання, вимірювали електрофізичні параметри (напругу холостого ходу – U_{xx} , струм короткого замикання – $i_{кз}$) на установці, яка показана на рис. 1.

Простір між зразком CdS і Ti, який виконує роль другого електроду (протиелектроду), заповнювали електролітом. Останній є сульфід-полісульфідна окисно-відновною системою, яка забезпечує контакт між CdS і протиелектродом. У результаті отримували систему: Cd | CdS | електроліт | Ti. Під час освітлення зразка на електродах в електроліті відбуваються окисно-відновні процеси: негативний – $2S^{2-} \rightarrow S_2^{2-} + 2e$; позитивний – $S_2^{2-} + 2e \rightarrow 2S^{2-}$. Сумарно – $S_2^{2-} \leftrightarrow 2S^{2-}$.

З метою забезпечення хімічної стійкості електродів, під час вимірювання електрофізичних параметрів плівок CdS, як електроліт використовують сульфід-полісульфідні окисно-відновні системи. У роботі використано 0,5 молярний електроліт на основі натрію полісульфіду (Na_2S_2). Синтезували Na_2S_2 безпосередньо в розчині за реакцією $Na_2S + S \leftrightarrow Na_2S_2$.

Для цього в 50 см^3 води розчиняли 9,76 г Na_2S , потім додавали 4 г S і перемішували за температури 323 K без доступу повітря до повного розчинення сірки. Отриманий концентрат розбавляли дистильованою водою до 250 см^3 [6].

Електрохімічну комірку і виключене джерело світла (діапроектор “Свитязь М” з галогеновою лампою Narva 150 Вт) розміщували у кожусі, який не пропускає світло. Під час включення освітлення питома потужність падаючого випромінювання на робочій поверхні становила $80 \text{ мВт}\cdot\text{см}^{-2}$. Реєстрацію даних здійснювали за допомогою універсального вольтамперметра Щ301-1. Вимірювали U_{xx} (напруга на кінцях електродів за розімкнутого кола) та $i_{kз}$ (максимальний струм системи виміряний в режимі короткого замикання) в темноті (темнові значення) і під час освітлення. За різницю темнових показів і за освітлення визначали електрофізичні характеристики досліджуваного зразка.

Результати досліджень. За наведеною вище методикою досліджень було встановлено, що напруга холостого ходу та струм короткого замикання для гетероконтактів з чистим CdS (див. табл. 1) є значно меншими в порівнянні з традиційними кремнієвими і тому з метою покращення цих характеристик було створено зразки з додаванням до робочого розчину солей цинку та нікелю, які, як і кадмій, є двовалентними перехідними металами.

Як видно з таблиці 1, додавання невеликої кількості цих добавок суттєво не впливає на вихідні характеристики, але разом з термічною обробкою (прожарюванням) дозволяє поліпшити вихідні фотоелектричні характеристики. Так, при прожарюванні на повітрі за температури 503 К протягом однієї години приріст середнього значення напруги холостого ходу становив $1,4\div 1,5$ рази, для струму короткого замикання $2\div 3,5$ рази відповідно для чистого CdS та з добавками Zn і Ni (табл. 2) і фотоелектричні показники зразків після випалу дорівнюють $U_{xx} = 0,45\dots 0,49 \text{ В}$ та $i_{kз} = 4,04\dots 6,32 \text{ мА/дм}^2$.

Таблиця 1 – Фотоелектричні показники гетерофазної системи Ti/CdS

	зразок 1*	зразок 2*	зразок 3*	зразок 4*
$U_T, \text{ В}$	-0,079	-0,090	-0,144	-0,090
$U_{CB}, \text{ В}$	+0,263	+0,212	+0,266	+0,261
$I_T, \text{ мА/дм}^2$	$-3,708 \cdot 10^{-3}$	$-9,112 \cdot 10^{-3}$	$-9,643 \cdot 10^{-3}$	$-3,846 \cdot 10^{-3}$
$I_{CB}, \text{ мА/дм}^2$	+2,833	+1,806	+2,351	+2,192
$\Delta U \equiv U_{xx}, \text{ В}$	0,342	0,302	0,410	0,351
$\Delta I \equiv i_{kз}, \text{ мА/дм}^2$	2,83	1,82	2,36	2,20

зразок 1* – одержані плівки CdS при використанні 0,28 моль/л CdCl_2 10мл. + 1,15 моль/л NaOH 10мл. + 25 % розч. NH_3 5мл. + 2,85 моль/л $\text{CS}(\text{NH})_2$ 10мл.;

зразок 2* – одержані плівки CdS+Zn при використанні 0,28 моль/л CdCl_2 10мл. + 1,15 моль/л NaOH 10мл. + 25 % розч. NH_3 5мл. + 2,85 моль/л $\text{CS}(\text{NH})_2$ 10мл. + 0,35 моль/л ZnSO_4 10мл.;

зразок 3* – одержані плівки CdS+ Zn при використанні 0,28 моль/л CdCl_2 10мл. + 1,15 моль/л NaOH 10мл. + 25 % розч. NH_3 5мл. + 2,85 моль/л $\text{CS}(\text{NH})_2$ 10мл.+ 0,35 моль/л ZnSO_4 20 мл.;

зразок 4* – одержані плівки CdS+ Ni при використанні 0,28 моль/л CdCl_2 10мл. + 1,15 моль/л NaOH 10мл. + 25 % розч. NH_3 5мл. + 2,85 моль/л $\text{CS}(\text{NH})_2$ 10мл. + 0,01 моль/л $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 10мл.;

Для з'ясування причин зростання фотовольтаїчних характеристик досліджуваних зразків проведено порівняльний аналіз морфології одержаних плівок методом електронної мікроскопії за допомогою растрового електронного мікроскопу-мікроаналізатора РЭММА-102-02 (рис. 2).

Аналіз зразків дозволив встановити, що отримані хімічним осадженням з водних розчинів плівки CdS, які характеризуються низькими значеннями електрофізичних параметрів (U_{xx} , I_{k3}) є поруватими та мають на поверхні агломерати часточок сульфїду кадмію різного розміру.

Таблиця 2 – Фотоелектричні показники гетерофазної системи Ti/CdS після прожарювання

	зразок 1	зразок 2	зразок 4
U_T , В	-0,187	-0,108	-0,167
U_{CB} , В	+0,299	+0,343	+0,290
I_T , мА/дм ²	$-20,942 \cdot 10^{-3}$	$-3,022 \cdot 10^{-3}$	$-24,643 \cdot 10^{-3}$
I_{CB} , мА/дм ²	+5,692	+6,319	+4,011
$\Delta U \equiv U_{xx}$, В	0,486	0,451	0,457
$\Delta I \equiv i_{k3}$, мА/дм ²	5,71	6,32	4,04

Так, зразок 1 (рис. 2а) містить велику кількість агломератів CdS та дефекти плівки у вигляді дірок. Після прожарювання на повітрі при температурі 503 К протягом однієї години спостерігається зменшення ділянок вкритих агломератами сульфїду кадмію, що відбувається за рахунок їх спікання і перекристалізації, зменшується кількість дірок і плівка стає більш рівномірною.

Зразок 4, отриманий з додаванням ніколю, не містить на поверхні агломератів, але є достатньо поруватим і має велику кількість дірок різної форми та діаметру. Після прожарювання (рис. 2г) у зразка 4, як і у зразка 1, зникають дірки, однак спостерігається поява агломератів CdS та утворень розгалуженої форми з підвищеним вмістом ніколю.

Плівка зразка 2, має рівномірну поверхню і містить лише окремі утворення сульфїду кадмію. Після випалу, як і для попередніх зразків, підвищується кількість агломератів та зростає зернистість.

Зв'язок фотовольтаїчних властивостей з відсутністю дірок у плівці вказує на те, що покращення характеристик відбувається за рахунок покращення морфології поверхні при протіканні рекристалізаційних процесів у плівці. У результаті, зменшення дефектів підвищуються фотоелектричні характеристики гетерофазного переходу Ti/CdS.

Таким чином, у результаті проведених досліджень вивчено напівпровідникові параметри гетерофазного переходу Ti/CdS, які характеризуються значеннями $U_{xx} = 0,45 \dots 0,49$ В та $i_{k3} = 4,04 \dots 6,32$ мА/дм². Установлено, що за умов зменшення дефектів у плівках покращуються їх фотоелектричні властивості, а сульфїд кадмію має достатні вихідні характеристиками щоб бути використаним у сонячних перетворювачах XXI сторіччя.

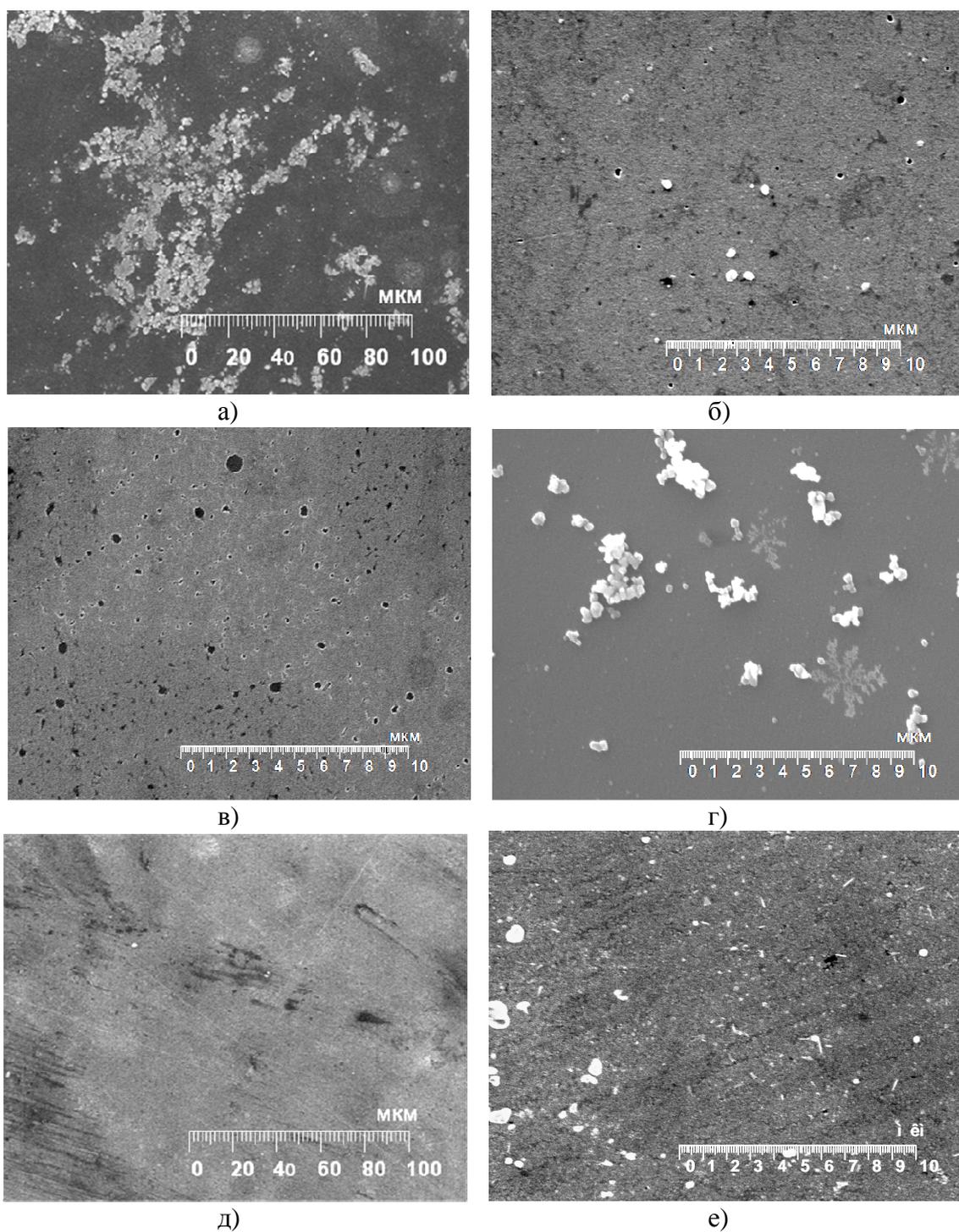


Рисунок 2 – Морфологія плівок сульфідів кадмію
 а) – чистий CdS; б) – чистий CdS після випалу;
 в) – CdS з додаванням ніколю; г) – CdS з додаванням ніколю після випалу;
 д) – CdS з додаванням цинку; е) – CdS з додаванням цинку після випалу

Література

1. Магомедов А.М. Нетрадиционные возобновляемые источники энергии. – Махачкала: "Юпитер", 1996. – 245 с.
2. Маляренко В.А. Энергетичні установки. – Харків: ХНАМГ, 2007. – 287 с.
3. Гаврилов С.А., Шерченков А.А., Апальков А.Б., Кравченко Д.А. Оптоэлектронные свойства пленок CdS для солнечных элементов с тонким абсорбирующим слоем // Российские нанотехнологии. – 2006. – Т. 1. – № 1-2. – С. 228–232.
4. Старов И.П., Кочкина М.В., Метелева Ю.В., Семенов В.Н., Клюев В.Г. Дефектная структура пленок системы CdS-ZnS и их люминесцентные свойства // Вестник ВГУ. – 2003. – № 2. – С. 71–75.
5. Гринь Г.И., Панчева А.М., Козуб П.А., Дейнека Д.Н. Исследование процесса получения пленок сульфида кадмия // Збірник наукових праць Дніпродзержинського державного технічного університету – Дніпродзержинськ: ДДТУ. – 2008. – № 2 (10). – С. 76–79.
6. Охремчук Є.В. Анодна поведінка кадмію у водних розчинах Na₂S // Збірка тез доповідей VI Всеукраїнської конференції студентів та аспірантів "Сучасні проблеми хімії" – Київ, 17-18 травня 2005. – С. 40.

Bibliography (transliterated)

1. Magomedov A.M. Netradicionnye vozobnovljaemye istochniki jenergii. – Machakala: "Jupiter", 1996. – 245 p.
2. Maljarenko V.A. Energetichni ustanovki. – Harkiv: HNAMG, 2007. – 287 p.
3. Gavrilov S.A., Sherchenkov A.A., Apal'kov A.B., Kravchenko D.A. Optojelektronnye svojstva plenok CdS dlja solnechnyh jelementov s tonkim absorbirujushhim sloem Rossijskie nanotehnologii. – 2006. – Т. 1. – # 1-2. – p. 228–232.
4. Starov I.P., Kochkina M.V., Meteleva Ju.V., Semenov V.N., Kljuev V.G. Defektnaja struktura plenok sistemy CdS-ZnS i ih ljuminescentnye svojstva Vestnik VGU. – 2003. – # 2. – p. 71–75.
5. Grin' G.I., Pancheva A.M., Kozub P.A., Dejneka D.N. Issledovanie processa poluchenija plenok sul'fida kadmija Zbirnik naukovih prac' Dniprodzerzhins'kogo derzhavnogo tehničnogo universitetu – Dniprodzerzhins'k: DDTU. – 2008. – # 2 (10). – p. 76–79.
6. Ohremchuk Є.V. Anodna povedinka kadmiju u vodnih rozchinah Na₂S Zbirka tez dopovidej VI Vseukraїns'koї konferencії studentiv ta aspirantiv "Suchasni problemi himiї" – Київ, 17-18 travnja 2005. – p. 40.

УДК 661.225:53.082.52

Гринь Г.И., Панчева А.М., Козуб П.А., Охремчук Э.В., Лавренко А.А.

**ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕМЕНТОВ
НА ОСНОВЕ СУЛЬФИДА КАДМИЯ**

Работа посвящена исследованию полупроводниковых параметров элементов на основе сульфида кадмия, которые отличаются простотой технологии получения и низкой себестоимостью изготовления. При проведении экспериментальных исследований

по изучению фотоэлектрических характеристик пленок на основе CdS были созданы гетероконтакты Ti/CdS и на основе анализа вольт-амперных характеристик изучены их свойства. При измерении напряжения холостого хода ($U_{xx} = 0,45 \dots 0,49$ В) и тока короткого замыкания ($i_{кз} = 4,04 \dots 6,32$ мА/дм²) было установлено наличие фотоэффекта.

Gryn G.I., Pancheva A.M., Kozub P.A., Okhremchuk Ye.V., Lavrenko A.A.

**PHOTOELECTRICAL CHARACTERISTICS OF ELEMENTS ON THE BASIS
OF CADMIUM SULFIDE**

The paper describes the study of semiconductor parameters for elements on the basis of cadmium sulfide which are characterized by the simplicity of production technology and the low production cost. When carrying out the experimental research of CdS-based films photoelectrical characteristics we created Ti/CdS heterocontacts and studied their properties on the basis of current-voltage characteristics. In the course of open circuit voltage ($U_{xx} = 0,45 \dots 0,49$ V) and short circuit current ($i_{кз} = 4,04 \dots 6,32$ mA/dm²) measurement we determined photoelectric effect presence.

УДК 536.7:66.02

Жадан В.А., Соловей С.А., Угненко Д.Н., Шаповалов А.В.

ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ЗАКРЫТЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ШАРНИРОВ ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ТИПА ДЛЯ ГУСЕНИЦ ВГМ

*Казенное предприятие «Харьковское конструкторское бюро по машиностроению
им. А.А. Морозова»*

Постановка задачи

В настоящее время прослеживается четкая тенденция увеличения массы вновь разрабатываемых и модернизированных изделий как легкой, так и тяжелой бронетехники за счет повышения требований, предъявляемых к уровню их защиты. При этом к гусеничным машинам предъявляются следующие требования: высокая надежность, низкие энергозатраты, низкая металлоемкость, конкурентоспособность на мировом рынке.

В обеспечении этих требований немаловажную роль играет гусеничный движитель (ГД), от рабочих характеристик которого зависят характеристики всей машины.

Одним из самых нагруженных узлов ГД является гусеница, которая воспринимает значительные нагрузки от силы тяги (P_t) и внешних воздействий при движении изделия.

В современных гусеничных машинах (ГМ) гусеницы выполняются с резино-металлическим шарниром (РМШ), в которых радиальная и тангенциальная нагрузка воспринимается резиновыми кольцами, привулканизованными на металлический палец или втулку. Расчеты показывают, что незначительное повышение ресурса ходимости гусениц с РМШ (за счет увеличения диаметра пальца, рабочей длины шарнира) влечет за собой увеличение габаритных размеров, металлоемкости конструкции, энергозатрат.

В связи с этим большую актуальность приобретает закрытый металлический шарнир (ЗМШ). В ЗМШ радиальную нагрузку воспринимают специальные металлические втулки, которые играют роль подшипников скольжения. Металлический шарнир уплотняется резиновыми кольцами, для предотвращения попадания в него абразива, испытывающими только тангенциальную нагрузку.

Гусеницы с ЗМШ могут воспринимать большие в сравнении с РМШ рабочие нагрузки, имеют потери на трение $\sim(0,08-0,10)$ при том, что внутренние потери на трение в существующих РМШ составляют $\sim(0,26-0,30)$.

Анализ последних достижений и публикаций

Так, войсковые испытания гусениц с закрытым шарниром на тягачах АТ-Л, а также МТ-Л, МТ-ЛБ показали, что применение ЗМШ позволяет резко повысить работоспособность гусениц и обеспечить срок службы движителя в объеме не менее (10–12) тысяч км пробега [1] Технический отчет начальника НИИ №21 М. Пронштейна.

Однако, при испытаниях существующих ЗМШ была выявлена существенная разница в величине износа по длине шарнира, что вызвано неравномерностью распределения нагрузки по рабочей длине втулки (пиковые нагрузки по краям шарнира – «краевой эффект»), вследствие чего повышается склонность к образованию задиров,

приводящих к росту коэффициента трения, температуры и является определяющим фактором в снижении долговечности гусениц.

Целью работы является решение этой проблемы путем оптимизации распределения нагрузки по рабочей длине шарнира.

Основная часть

Для решения этой проблемы рассмотрим расчет распределения нагрузок по рабочей длине двух ЗМШ, из которых:

- опытный шарнир (см. Рисунок 1а) состоит из пакета стальных втулок (1), на наружной поверхности которого привулканизован тонкий слой резины (2), двух уплотнений (3) и пальца (7). Резиновый слой пакета втулок позволяет последним в зависимости от прогиба пальца под воздействием силы тяги самоустанавливаться, тем самым сглаживая неравномерную нагрузку по длине пальца;
- классический шарнир представляющий собой цельнометаллическую втулку, два уплотнения и палец (рисунок 1б).

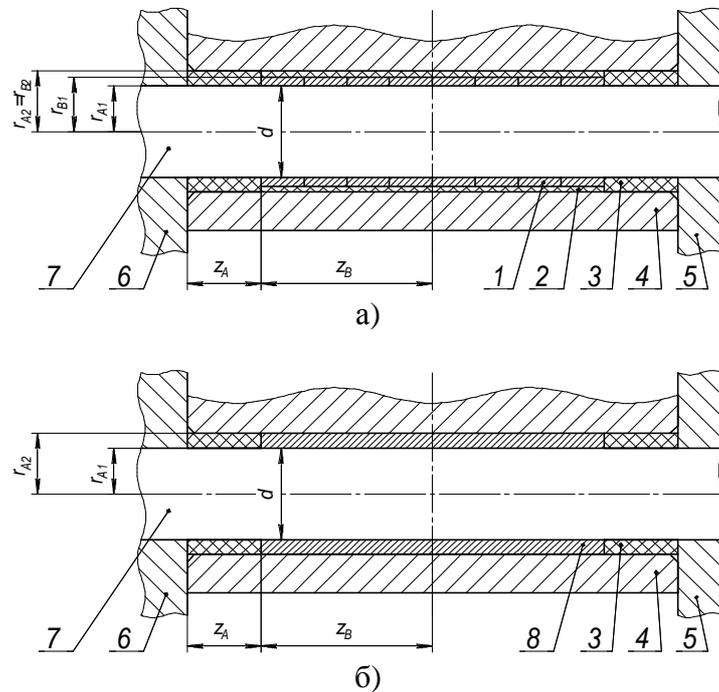


Рисунок 1 – Гусеница с ЗМШ

а) с опытным шарниром; б) с шарниром классического типа

1 – пакет втулок; 2 – резиновое основание втулок; 3 – уплотнение; 4 – трак; 5 – гребень;

6 – скоба; 7 – палец; 8 – втулка

Учитывая, что опытный шарнир выполнен в виде n-го количества узких втулок, опирающихся на упругое основание, решение задачи расчета построим на теории расчета балок, лежащих на упругом основании [2].

При выполнении расчета примем следующие допущения:

- жесткость резинового основания постоянна по всей длине шарнира и подчиняется условиям Винклера (реакция основания в любом сечении пропорциональна перемещениям в нем);
- упругие деформации проушин трака пренебрежимо малы.

Запишем уравнения изогнутой оси балки

$$\frac{d^4 v}{d\xi^4} + 4v = f(\xi); \quad f(\xi) = \frac{4}{k} \cdot q, \quad (1)$$

где k – погонная жесткость основания; v – прогиб балки; q – распределенная нагрузка, ξ – безразмерная абсцисса,

$$\xi = m \times z, \quad (2)$$

где m – коэффициент перевода текущей координаты в безразмерную:

$$m = \sqrt[4]{\frac{k}{4EJ}}, \quad (3)$$

где EJ – жесткость пальца на изгиб; z – расстояние от начала координат до конца участка,

В общем случае, для участков шарнира, уравнение изогнутой оси пальца определяется выражением:

$$v(\xi) = V_1(\xi) \cdot C_1 + V_2(\xi) \cdot C_2 + V_3(\xi) \cdot C_3 + V_4(\xi) \cdot C_4, \quad (4)$$

где $V_i(\xi)$ – фундаментальная функция Крылова или повторяющиеся функции Пузыревского, которые могут быть взяты из таблиц [2] или вычислены по формулам:

$$V_1(\xi) = ch\xi \cdot \cos \xi; \quad (5)$$

$$V_2(\xi) = \frac{1}{2} (ch\xi \cdot \sin \xi + sh\xi \cdot \cos \xi); \quad (6)$$

$$V_3(\xi) = \frac{1}{2} sh\xi \cdot \sin \xi; \quad (7)$$

$$V_4(\xi) = \frac{1}{4} (ch\xi \cdot \sin \xi - sh\xi \cdot \cos \xi), \quad (8)$$

где C_1, C_2, C_3, C_4 – неизвестные постоянные интегрирования.

Дифференцируя уравнение (4), получим уравнения, определяющие угол поворота сечения, изгибающий момент, и перерезывающую силу:

$$v(\xi) = V_1(\xi) \cdot C_1 + V_2(\xi) \cdot C_2 + V_3(\xi) \cdot C_3 + V_4(\xi) \cdot C_4; \quad (9)$$

$$\Theta(\xi) = m \cdot (-4V_4(\xi) \cdot C_1 + V_1(\xi) \cdot C_2 + V_2(\xi) \cdot C_3 + V_3(\xi) \cdot C_4); \quad (10)$$

$$M(\xi) = EJ \cdot m^2 \cdot (-4V_3(\xi) \cdot C_1 - 4V_4(\xi) \cdot C_2 + V_1(\xi) \cdot C_3 + V_2(\xi) \cdot C_4); \quad (11)$$

$$Q(\xi) = EJ \cdot m^3 \cdot (-4V_2(\xi) \cdot C_1 - 4V_3(\xi) \cdot C_2 - 4V_4(\xi) \cdot C_3 + V_1(\xi) \cdot C_4). \quad (12)$$

Неизвестные постоянные интегрирования находятся с учетом граничных условий на концах расчетной схемы. В начале участка A угол поворота сечения пальца равен нулю.

При $z_A = 0$

$$\Theta^A(0) = 0. \quad (13)$$

Для стыка участка A и B :

при $z_A = \xi_A$, $z_B = 0$

$$v^A(\xi_A) = v^B(0); \quad (14)$$

$$\Theta^A(\xi_A) = \Theta^B(0); \quad (15)$$

$$M^A(\xi_A) = M^B(0); \quad (16)$$

$$Q^A(\xi_A) = Q^B(0). \quad (17)$$

Симметрия расчетной схемы позволяет вести расчет до половины длины шарнира. В середине шарнира (конец участка B) угол поворота сечения пальца и перерезывающая сила равны нулю.

При $z_B = \xi_B$

$$\Theta^B(\xi_B) = 0; \quad (18)$$

$$Q^B(\xi_B) = 0. \quad (19)$$

Уравнение равновесия

$$\frac{P_T}{4} = (\Theta^A(\xi_A) - \Theta^A(0)) + (\Theta^B(\xi_B) - \Theta^B(0)). \quad (20)$$

Решая матрицу (21), составленную из системы уравнений 13–20 находим постоянные C для участков A и B .

$$\begin{pmatrix} C_{A1} \\ C_{A2} \\ C_{A3} \\ C_{A4} \\ C_{B1} \\ C_{B2} \\ C_{B3} \\ C_{B4} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v(\xi_A)_1 & v(\xi_A)_2 & v(\xi_A)_3 & v(\xi_A)_4 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ -4m_A v(\xi_A)_4 & m_A v(\xi_A)_1 & m_A v(\xi_A)_2 & m_A v(\xi_A)_3 & 0 & -m_B & 0 & 0 \\ 4EJm_A^2 v(\xi_A)_3 & 4EJm_A^2 v(\xi_A)_4 & -EJm_A^2 v(\xi_A)_1 & -EJm_A^2 v(\xi_A)_2 & 0 & 0 & EJm_B^2 & 0 \\ 4EJm_A^3 v(\xi_A)_2 & 4EJm_A^3 v(\xi_A)_3 & 4EJm_A^3 v(\xi_A)_4 & -EJm_A^3 v(\xi_A)_1 & 0 & 0 & 0 & EJm_B^3 \\ 0 & m_A & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -4m_B v(\xi_B)_4 & m_B v(\xi_B)_1 & m_B v(\xi_B)_2 & m_B v(\xi_B)_3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 4EJm_B^3 v(\xi_B)_2 & 4EJm_B^3 v(\xi_B)_3 & 4EJm_B^3 v(\xi_B)_4 & -EJm_B^3 v(\xi_B)_1 \\ 0 & 0 & 0 & EJm_A^3 v(\xi_A)_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{P_T}{4} \end{pmatrix}, \quad (21)$$

где

$$EJ = E \cdot \frac{\pi d^4}{64} = 8348,2 \cdot HМ^2. \quad (22)$$

При $E = 2,1 \cdot 10^{11} \frac{H}{M^2}$, $d = 3 \cdot 10^{-2} M$ (диаметр пальца) погонная жесткость основания опытного шарнира на участках A и B находится по формулам [2], [3]

$$k_A = \frac{c_A}{z} = \frac{4\pi \cdot G_p}{\ln \left[\frac{r_{2A}}{r_{1A}} \right] - \frac{r_{2A}^2 - r_{1A}^2}{r_{2A}^2 + r_{1A}^2}} = 4,876 \cdot 10^8 \frac{H}{M^2}; \quad (23)$$

$$k_{Bo} = \frac{c_B}{z} = \frac{4\pi \cdot G_p}{\ln \left[\frac{r_{2B}}{r_{1B}} \right] - \frac{r_{2B}^2 - r_{1B}^2}{r_{2B}^2 + r_{1B}^2}} = 9,651 \cdot 10^9 \frac{H}{M^2} \text{ (опытного шарнира);} \quad (24)$$

$$k_{Bk} = \frac{E}{6(1-2\mu)} = 8,748 \cdot 10^{10} \frac{H}{M^2} \text{ (классического шарнира),} \quad (25)$$

где $G_p = 2,98 \cdot 10^5 \frac{H}{M^2}$ – модуль сдвига резины (ИРП-1393) уплотнения и шарнира;
 $\mu = 0,3$ – коэффициент Пуассона для стали; $r_{1A}, r_{2A}, r_{1B}, r_{2B}$ – радиусы резиновых элементов шарнира на участках A и B (рисунок 1)

$$z_A = 2,4 \cdot 10^{-2} M, \quad z_B = 5,5 \cdot 10^{-2} M;$$

$$m_A = \sqrt[4]{\frac{k_A}{4EJ}} = 10,993 \cdot M^{-1}, \quad m_{Bo} = \sqrt[4]{\frac{k_{Bo}}{4EJ}} = 23,186 \cdot M^{-1}, \quad m_{Bk} = \sqrt[4]{\frac{k_{Bk}}{4EJ}} = 40,232 \cdot M^{-1};$$

$$\xi_A = m_A \cdot z_A = 0,264, \quad \xi_{Bo} = m_{Bo} \cdot z_{Bo} = 1,275, \quad \xi_{Bk} = m_{Bk} \cdot z_{Bk} = 2,213.$$

Для сравнения нагрузок возникающих в опытном шарнире и ЗМШ классического типа построим (рис. 2) эпюры распределения нагрузок в этих шарнирах.

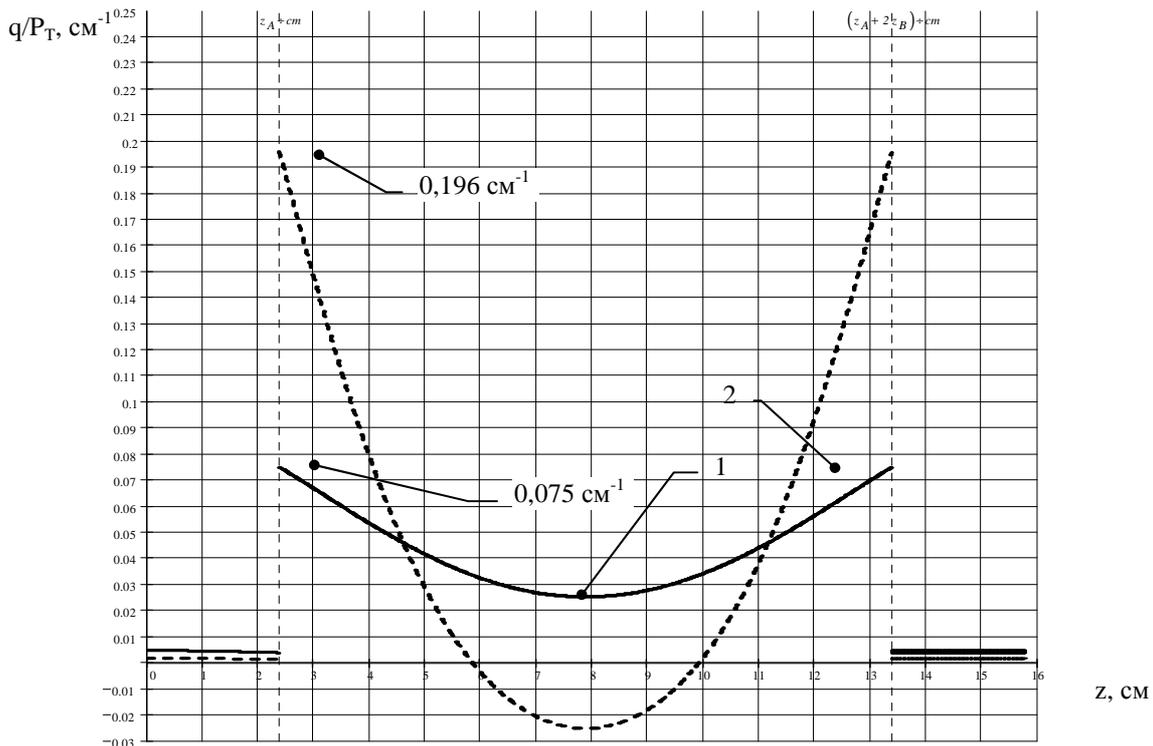


Рисунок 2 – Эпюры распределения нагрузок в ЗМШ
 1 – опытного шарнира, 2 – шарнира классического типа

Из сопоставления эпюр видно, что на краях втулки классического шарнира возникают нагрузки, которые в 2,6 раза больше, чем в опытном шарнире. Наличие таких пиковых нагрузок на краях втулки способствует возникновению задиров, приводящих к росту коэффициента трения, температуры и ускоренному износу шарнира.

Результаты проведенных сравнительных стендовых испытаний [4] опытного ЗМШ (с самоустанавливающимися втулками на резиновом основании) и классического ЗМШ подтвердили:

- износ пары трения опытного ЗМШ в 2–3 раза ниже, чем в классического ЗМШ;
- во время испытаний температурные характеристики опытного шарнира имели стабильный характер и были в 1,45–1,55 раз ниже, чем у классического ЗМШ, а следовательно имели стабильный коэффициент трения;
- во время испытаний ЗМШ классического типа наблюдался постоянный рост температуры, что связано с неравномерным его нагружением по длине и возникновением задиров.

Выводы

1. В настоящей статье рассмотрена оптимизация распределения нагрузок по рабочей длине ЗМШ гусениц за счет применения пакета самоустанавливающихся втулок на единой резиновой основе.

2. Применение в гусенице ЗМШ с пакетом самоустанавливающихся втулок (опытный шарнир) позволит, за счет более равномерного распределения нагрузок в шарнире, поднять их нагрузочную способность, снизить потери в гусеничном движителе и значительно повысить его ресурс.

Литература

1. Технический отчет начальника НИИ №21 М. Пронштейна «Отработка предложений и рекомендаций по повышению надежности элементов гусениц с закрытыми шарнирами транспортеров-тягачей МТ-Л и МТ-ЛБ», 1965.
2. Расчеты на прочность в машиностроении. Сб. под руководством С.Д. Пономарева, М., Mashgiz, 1956, том 1.
3. Потураев В.Н., Дырда В.И. Резиновые детали машин. Машиностроение, 1977.
4. Техническая записка № 98 от 25.07.1994г. предприятия п/я А-3530 «О результатах стендовых испытаний полномерного закрытого металлического шарнира параллельного типа».

Bibliography (transliterated)

1. Tehnicheskij otchet nachal'nika NII #21 M. Pronshtejna «Otrabotka pred-lozhenij i rekomendacij po povysheniju nadezhnosti jelementov gusenec s zakrytymi sharnirami transporterov-tjagachej MT-L i MT-LB», 1965.
2. Raschety na prochnost' v mashinostroenii. Sb. pod rukovodstvom S.D. Ponomareva, M., Mashgiz, 1956, tom 1.
3. Poturaev V.N., Dyrda V.I. Rezinovye detali mashin. Mashinostroenie, 1977.
4. Tehnicheskaja zapiska # 98 ot 25.07.1994g. predpriyatija p/ja A-3530 «O rezultatah stendovyh ispytanj polnomernogo zakrytogo metallicheskogo sharnira paral-l'elnogo tipa».

УДК 536.7:66.02

Жадан В.А., Соловей С.А., Угненко Д.М., Шаповалов О.В.

ОПТИМІЗАЦІЯ КОНСТРУКТИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ЗАКРИТИХ МЕТАЛЕВИХ ШАРНІРІВ ПАРАЛЕЛЬНОГО ТИПУ ДЛЯ ГУСЕНИЦЬ ВГМ

Забезпечення оптимального розподілу навантаження по робочій довжині закритих металевих шарнірів гусениць для підвищення їх несучої здатності та ресурсу при зменшених розмірах.

Zhadan V.A., Solovey S.A., Ugnenko D.N., Shapovalov A.V.

OPTIMIZATION OF STRUCTURAL CELL CLOSED METAL HINGES PARALLEL FOR THE CATERPILLAR'S OBJECTS OF MILITARY EQUIPMENT

Ensuring optimal distribution of loads on the working length of the closed metal hinges caterpillars to increase their carrying capacity, resource, while reducing their size.

Усатый А.П.

ПРОТОЧНАЯ ЧАСТЬ ОСЕВОЙ ТУРБИНЫ КАК ОБЪЕКТ ИНТЕГРИРОВАННОГО ИНФОРМАЦИОННОГО ПРОСТРАНСТВА САПР «ТУРБОАГРЕГАТ»

Постановка и актуальность проблемы. В современных условиях ни одно из предприятий, производящих сложное и уникальное оборудование, не может успешно конкурировать на рынке без активного использования систем автоматизированного проектирования (САПР) или, в крайнем случае, их отдельных, наиболее важных предметных компонент. Известно, что качество, эффективность, удобство использования являются основными предпосылками широкого внедрения в практику проектирования разрабатываемых САПР. Отмеченные выше свойства во многом зависят от возможностей тех инструментов, которые предоставляют САПР для создания и совершенствования информационных моделей объектов проектирования (ОП) в течение всего жизненного цикла изделия. Отмеченный факт требует особого внимания не только к разработке информационных моделей сложных технических объектов (СТО), к которым, безусловно, относится и проточная часть (ПЧ) мощных паровых турбин, но и средствам и методам формирования и совершенствования таких моделей.

Современные тенденции развития методологии создания информационных моделей СТО с длительным жизненным циклом базируются на необходимости описания всех стадий и состояний этого цикла.

Одно из общих и важных требований, предъявляемых к структуре информационных моделей, заключается в необходимости учитывать высокую вариантность проектных данных таких изделий («как задумано», «как спроектировано», «как изготовлено», «как существует при эксплуатации») [1].

Одна из возможных реализаций учета высокой вариантности данных предложена в САПР судов [2], где формирование информационной модели основано на построении обобщенных схем представления информации о судне, которые являются неотъемлемой составной частью систем сопровождения жизненного цикла объекта проектирования.

Достаточно серьезное внимание формированию информационной модели ОП уделено в работе [3], в которой она была реализована как инвариантная интегрированная структурно-функциональная параметрическая модель, охватывающая описание ОП на протяжении всего жизненного цикла, что позволило выполнять необходимые функции проектирования и контроля с использованием единых принципов описания объектов.

Рассмотрению принципов построения ЭИМК – электронной информационной модели корабля, отображающей его информационную структуру и использование этой структуры на различных этапах его жизненного цикла, посвящена работа [4].

Традиционно, особое внимание разработке САПР и, в частности, информационных моделей ОП уделяется в авиационной отрасли, например [5].

В большинстве современных работ по информационным моделям СТО сделан упор на объектно-ориентированную технологию формирования информации об ОП. Именно такой подход предоставляет пользователям новые возможности по накоплению и классификации информации об изделии, в том числе и о правилах, описывающих

элементы объекта, вспомогательной и справочной информации, а также различных мультидисциплинарных приложениях. Помимо этого, единый, динамически развивающийся цифровой шаблон ОП, собирающий в себе всеобъемлющую информацию об СТО, позволяет коренным образом изменить традиционные подходы, как проектированию, так и к вопросам изготовления и эксплуатации.

Все же следует отметить, что, не смотря на существование общих принципов построения информационных моделей СТО, в каждом конкретном случае такие модели должны учитывать не только существующий опыт проектирования конкретного производителя, но и наличие специфик, отражающих его технологический потенциал. Это, безусловно, накладывает свои особенности на структурно-топологическую организацию, методы и формы управления информационными моделями СТО.

Как видно, вопросам разработки информационных моделей СТО, к которым в полной мере относятся и осевые турбины, уделяется достаточно много внимания, особенно в области кораблестроения, авиастроения и общего машиностроения. Вместе с тем, решению научных проблем, связанных с созданием информационной модели ПЧ осевой турбины, как объекта САПР, посвящено еще явно не достаточно работ ученых и специалистов. В основном эта проблема нашла свое отражение в исследованиях, связанных с разработкой САПР «Турбоагрегат» [6, 7]. Хотя необходимость выполнения таких работ не вызывает сомнения, т.к. она обусловлена в первую очередь не только постоянным ростом конкуренции и все возрастающими требованиями сокращения сроков проектирования и изготовления, но и необходимостью сопровождения каждого экземпляра изготовленной турбины в течение всего жизненного цикла.

Цель исследования. К числу важнейших задач, требующих решения при создании интегрированной структурно-топологической информационной модели (ИСТИМ) ПЧ осевой турбины и использовании ее как единого шаблона при построении информационного пространства проекта, в первую очередь следует отнести:

1. Разработку формата метаданных, описывающих информационную модель ПЧ.
2. Разработку инвариантных средств создания и редактирования метаданных информационной модели ПЧ.
3. Создание информационной модели ПЧ в виде единого динамического структурно-топологического шаблона с конкретным набором метаданных.
4. Разработку средств формирования и управления информационным пространством проекта на базе метаданных единого динамического шаблона информационной модели ПЧ.
5. Разработку и реализацию метода, обеспечивающего работу алгоритмической части мультидисциплинарных моделей расчета ПЧ непосредственно с данными из проекта с иерархической формой их представления и визуализации.

При этом, разработанные соответствующие инвариантные методы и алгоритмы должны обеспечивать не только формирование информационных моделей, но и предоставлять возможность их совершенствования с учетом появления новых моделей расчета ПЧ, новых технологий САПР, изменения технологических возможностей производителя, новой информации об условиях эксплуатации и т.д.

Основная часть. Учитывая тот факт, что метаданные о структурно-топологических и разного рода функционально-параметрических связях информационной модели ПЧ хранятся в реляционной базе данных [6], а ее представление в редакторе ресурсов и проектах реализуется в виде иерархически организованных множеств

различного рода информации, потребовалась разработка специальных правил и формата хранения такой информации. Для алгоритмизации отмеченных правил была заимствована идея множественных термов [8]. Такой прием позволил представить информацию об ОП, в том числе и о его структурно-топологической иерархии в виде строк, содержащих линейные наборы необходимых констант, в том числе и уникальных индексов, соответствующих подчиненным записям реляционной базы данных, что существенным образом упростило хранение информации и ее обработку. В качестве примера, ниже приведена часть строки, содержащая некоторые сведения о записи «Турбина осевая», куда входят и индексы подчиненных ей, согласно рисунку 1, записей в БД:

«1002;TurbineAxial_n;3;25;25+17;87;1111100000+Турбина осевая;Турбіна осьова;Turbine Axial;+1050;1003;2842;2843;2844;2845;2985+848;849», 1)

где

- «1002» - индекс записи в БД, соответствующий информации о «Турбине осевой».
- «1050;1003;2842;2843;2844;2845;2985» – индексы записей в БД, соответственно для «Данные по осевой турбине»; «Ступень»; «Критерии качества»; «Функциональные ограничения»; «Оптимизируемые параметры»; «Режимные параметры»; «Тип конструкции».
- «848;849» – индексы записей, соответствующие моделям расчета ПЧ – «1D Прямой расчет осевой турбины» и «2D Прямой расчет осевой турбины». В связи с тем, что записи с индексами «848;849» относятся к структуре «Библиотеки моделей расчета», они не визуализируются в структуре «Объекты проектирования».

Аналогично, подчиненные узлы информации, с перечисленными выше индексами, имеют свою структурно-топологическую иерархию и свое содержание соответствующих им записей в БД. Как видно из строки (1) последовательность включения в список индексов подчиненных узлов не имеет значения, что упрощает обработку этой информации и расширяет возможности модификации и совершенствования разрабатываемой информационной модели ПЧ осевой турбины и других объектов САПР «Турбоагрегат».

Для решения 2-й задачи в САПР «Турбоагрегат» [6] был разработан специальный редактор ресурсов, фрагмент которого показан на рисунке 2. Данный редактор включает в себя:

- конструктор структурной топологии информационных моделей;
- конструктор средств интеграции с внешними источниками данных;
- конструктор внутренних функционально-параметрических связей с мультидисциплинарными солверами ПЧ и других объектов турбоагрегата;
- конструктор формирования справочных и атласных данных;
- конструктор управления полномочиями пользователей, и др.

Специально созданные методы и алгоритмы, использующиеся в редакторе ресурсов, позволяют формировать информационную модель ПЧ, осуществлять модификацию ее структурной топологии, выполнять различные настройки, устанавливать функционально-параметрические связи со справочниками и атласами и другие операции по совершенствованию информационной модели. Примечательно, что все отмеченные операции совершенно не требуют изменения кода той части ПО, которая ис-

пользует информационную модель ПЧ, как шаблон с метаданными при развертывании проекта в оперативной памяти компьютера.

Любое изменение информационной модели, выполненное через редактор ресурсов, автоматически включается, как в ранее созданные проекты ПЧ осевых турбин, так и во вновь создаваемые.

На рисунке 2 приведен фрагмент редактора ресурсов в режиме работы **конструктора внутренних функционально-параметрических связей** с мультидисциплинарными солверами объектов турбоагрегата.

Как видно из рисунка установление функционально-параметрических связей между параметрами информационной модели ПЧ и соответствующими параметрами из массивов данных моделей расчета является достаточно простой операцией – необходимо поставить отметку в окошке **CheckBox**, связанному с требуемым элементом массива и информация об отмеченной связи будет занесена в строку данных выбранного параметра. Данная информация будет использована при формировании информационного пространства проекта и настройки адресов параметров, расчетных моделей с параметрами информационной модели ОП в проекте. Строка из записи в БД ресурсов, содержащая информацию о связи, показанной на рисунке 2, приведена ниже.

«**2501**;it_in;7;25;;1050+2;0;0000000000+полная энтальпия на входе в цилиндр;
 повна ентальпія на вході до циліндру;total enthalpy at inlet;+532;12;7;1;1;566;1+ 2)
 1050;2717;2841;2845;783;791;3320~1902;2196+~**0/2486/848**~1/2559/2556+»,

где

- «**2501**» – индекс записи в БД, соответствующий информации о «**полной энтальпии на входе в цилиндр**».
- «**0/2486/848**» – фрагмент записи, показывающий, что в записи с индексом «**848**» модели «**1D Прямой расчет осевой турбины**» имеется подчиненная запись с индексом «**2486**» – «**Массив режимных параметров**», 0-й элемент которого соответствует параметру «**полная энтальпия на входе в цилиндр**» информационной модели ПЧ.

Иерархическая топология ИСТИМ ПЧ построена таким образом, что «вся» информация о ПЧ структурирована в соответствии используемыми классами элементов информационной модели. К числу основных классов относятся:

- Объект проектирования.
- Таблица.
- Вектор.
- Параметр.

Элементы класса «Объект проектирования» используются для формирования скелета структурной топологии ИСТИМ ПЧ. Одно из основных качеств элементов данного класса заключается в наличии у них свойства мультипликативности. Имеется в виду, что элементы этого класса в проекте могут размножаться вместе со всей подчиненной им информацией. В ИСТИМ ПЧ к числу таких элементов относятся «Турбина осевая», «Ступень» и «Сечение». Таким образом, подразумевается, что в проекте может быть несколько турбин, каждая из которых может состоять из нескольких ступеней, которые, в свою очередь, могут иметь по несколько сечений вдоль радиуса.

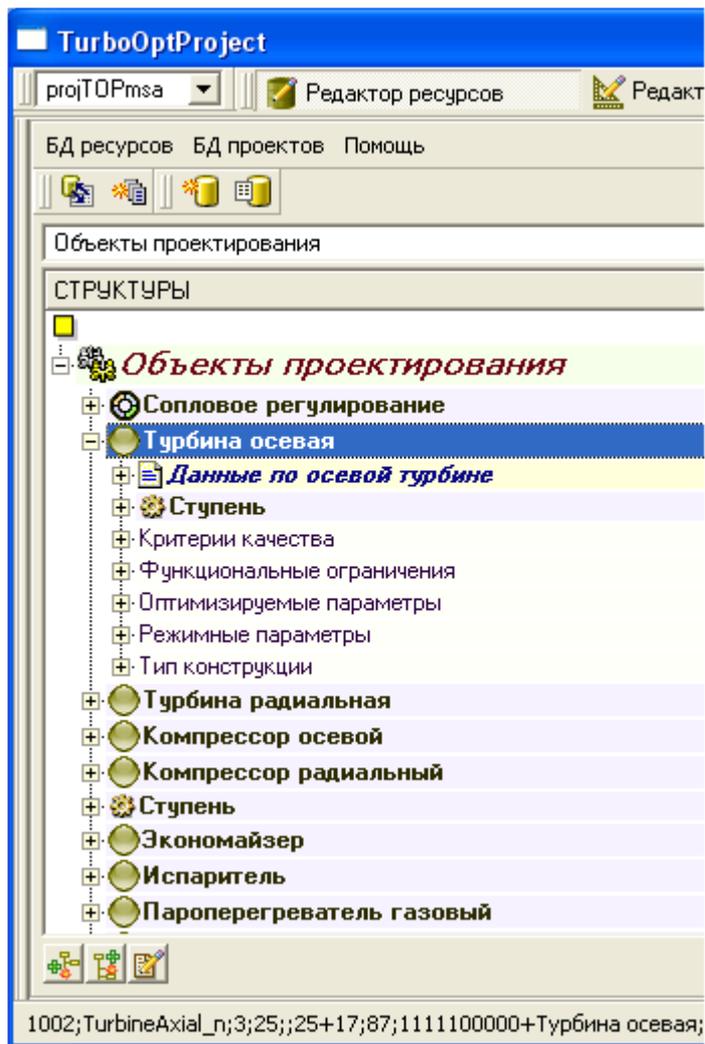


Рисунок 1 – Структурно-топологические информационные связи первого уровня иерархии для ОП «Турбина осевая»

то же свойство объекта. Например, параметр, соответствующий давлению рабочего тела на входе в цилиндр, имеет **параметр-клон** – давление рабочего тела перед первой ступенью цилиндра и т.п.

Кроме того, в описании элементов класса «Объект проектирования» предусмотрены множественные термы, хранящие информацию о связях с моделями расчета, с атласами конструкций и образцов этих ОП в схемах и т.д.

Таким образом, применение редактора ресурсов, с перечисленным набором конструкторов позволяет не только формировать ИСТИМ ПЧ, но и в случае необходимости ее редактировать и совершенствовать. Например, в структуру ИСТИМ ПЧ осевой турбины (рисунок 1) специально были введены информационные группы: «Критерии качества», «Функциональные ограничения», «Оптимизируемые параметры» и «Режимные параметры». Данные группы представляют собой динамические векторы ссылок на соответствующие параметры ПЧ и предназначены для представления необходимой информации в редакторе постановок задач оптимального проектирования ПЧ. Естествен-

Элементы класса «Таблица» предназначены для тематической группировки параметров, описывающих ПЧ осевой турбины. Класс «Вектор» предназначен для создания различного назначения динамических списков параметров. Класс «Параметр» используется непосредственно для описания свойств параметров, характеризующих ПЧ. Алгоритмы конструктора структурной топологии информационных моделей построены таким образом, что позволяют иерархически подчинять элементам класса «Объект проектирования» элементы классов «Объект проектирования», «Таблица» и «Вектор». Элементы классов «Таблица» и «Вектор» могут иметь у себя в подчинении только элементы класса «Параметр». Элементы класса «Параметр», также могут иметь у себя в подчинении элементы класса «Параметр». Такой прием используется для идентификации **параметр-клонов**, т.е. параметров, находящихся физически на разных уровнях иерархии шаблона ИСТИМ, но по своей предметной сути, отражающих одно и

но, с помощью редактора ресурсов (рисунок 2) набор компонент этих векторов можно легко изменить, что существенно образом расширяет возможности проектировщиков и классы решаемых оптимизационных задач.

Безусловно, к числу наиболее важных средств формирования и управления информационным пространством проекта ПЧ следует отнести механизмы навигации по информационному пространству проекта и выполнение различного рода групповых операций, как с объектами проекта, так и с параметрами их описывающими. Учитывая, что ИСТИМ ПЧ представляет собой иерархически организованные блоки информации, отмеченные выше две задачи, представляют в некотором смысле и самостоятельный интерес.

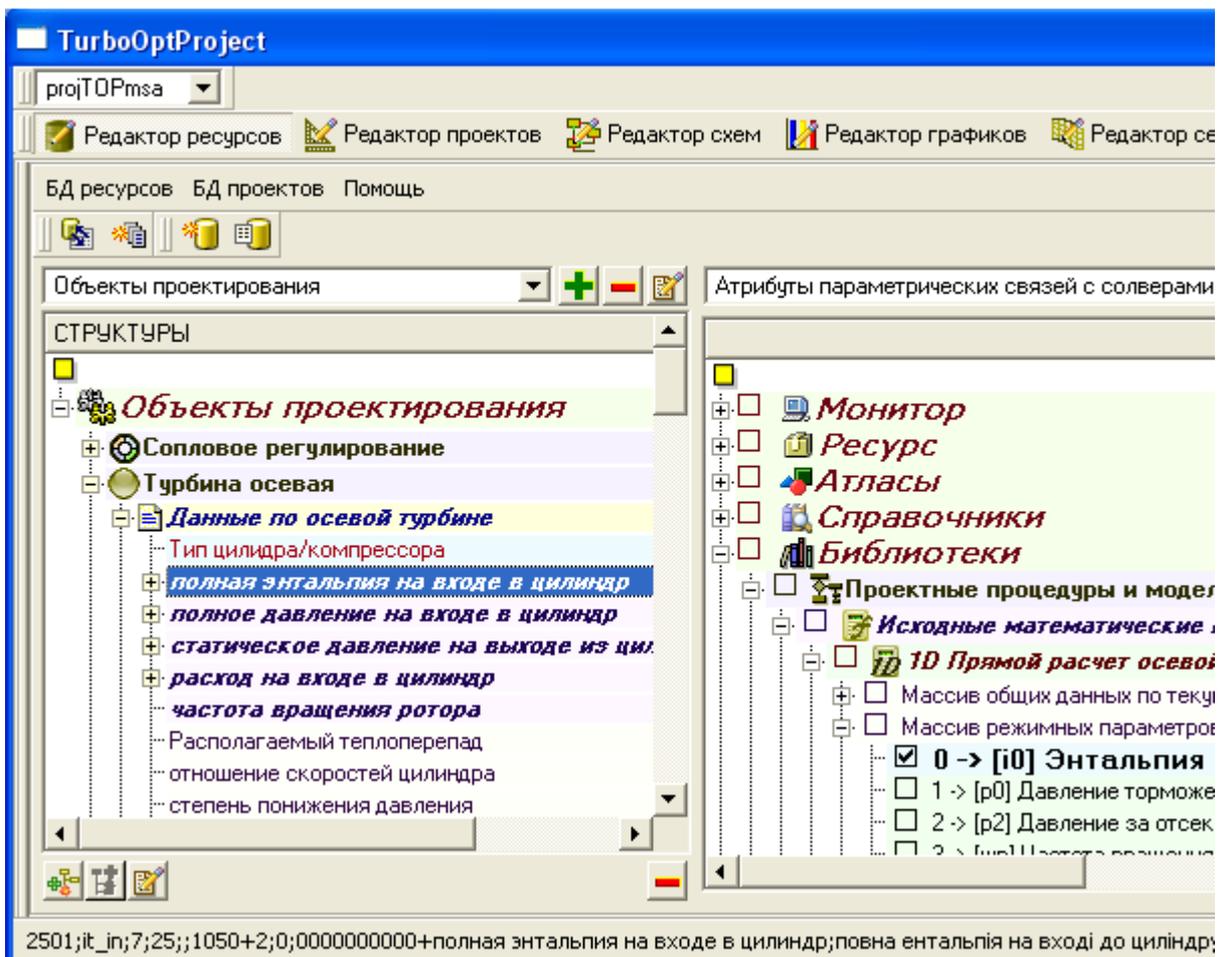


Рисунок 2 – Фрагмент редактора ресурсов в режиме работы конструктора внутренних функционально-параметрических связей

Созвучная проблема, заключающаяся в построении механизма однозначного связывания иерархического представления информации с ее реляционным представлением в СУБД, в настоящее время, помимо рекомендаций [9], имеет достаточно много решений, например [10, 11]. К сожалению, идеи, реализованные в отмеченных работах, не пригодны для прямого использования с целью организации эффективной навигации по проекту, а также выполнения необходимых групповых операций. В то же время использование возможностей реляционных СУБД для решения отмеченных выше задач представляется весьма перспективным. С точки зрения скорости выполнения различ-

ных операций навигации и выборки наиболее предпочтительным является использование сервера SQLite. Особенность этого сервера заключается в том, что он способен поддерживать операции создания SQL таблиц в оперативной памяти компьютера, а не только на жестком диске, как это предусмотрено в большинстве общеизвестных и доступных серверов. Работа с SQL таблицами, размещенными в оперативной памяти компьютера, требует существенно меньше временных ресурсов при выполнении различного рода операций.

При разработке механизма навигации по ИСТИМ ПЧ проекта был использован прием индексации его информационного пространства. Для этих целей все пространство было разделено на два множества в соответствии с классами элементов: «Объекты проектирования» и «Параметры». Для каждого множества в оперативной памяти компьютера созданы с помощью СУБД SQLite соответствующие индексные SQL таблицы. Структура этих таблиц сформирована таким образом, что позволяет с помощью простых и лаконичных SQL запросов перемещаться по информационному пространству проекта, а также осуществлять различные групповые выборки, как объектов проектирования, так и параметров. Основные поля этих таблиц предусмотрены для хранения следующей информации:

- текущего уникального индекса записи в таблице об элементе информационного пространства проекта;
- уникального индекса элемента в БД ресурсов;
- номера элемента в проекте (для объекта проектирования).

Кроме того, в таблицах предусмотрены поля под аналогичную информацию для элемента информационного пространства, расположенного на один иерархический уровень выше («отца») индексируемого текущего элемента.

Заполнение этих таблиц осуществляется параллельно с загрузкой проекта. **Наиболее важной особенностью индексирования** информационного пространства проекта посредством занесения информации об элементах этого пространства в отмеченные SQL таблицы является тот факт, что в качестве **текущего уникального индекса элемента** и его «отца» выступают **преобразованные к типу «unsigned» значения физических адресов соответствующих элементов в оперативной памяти компьютера**. Такой прием позволяет после выполнения необходимого SQL запроса, простым преобразованием значения уникального индекса элемента из типа «unsigned» в **формат физических адресов оперативной памяти** компьютера получить непосредственно прямой доступ к требуемому элементу информационного пространства проекта. Использование СУБД SQLite, а также описанного выше способа индексации в комплексе, представляют собой универсальный высокоэффективный механизм навигации по иерархически организованному информационному пространству проекта.

Для обеспечения работы алгоритмической части мультидисциплинарных моделей расчета ПЧ непосредственно с данными из информационного пространства проекта с иерархической формой их представления и визуализации был разработан специальный инвариантный метод. Данный метод основывается на замене в моделях расчета ПЧ массивов данных на соответствующие им массивы указателей (адресов). Такой подход позволяет вместо заполнения массивов конкретными величинами, присвоить элементам массивов значения адресов соответствующих параметров из иерархической структуры данных информационного пространства каждого конкретного проекта, связав, тем самым, алгоритмическую часть модели расчета с данными проекта. Указанная операция осуществляется один раз при инициализации модели. Для этой цели используется информация из соответствующего термина каждого конкретного параметра аналогично

(2). Таким образом, обработав информацию из термов, отвечающих за связи между данными проекта и моделью расчета, заполняются все массивы модели расчета адресами конкретных параметров из иерархической формы представления данных по ОП, предоставляя тем самым доступ алгоритмической части модели к необходимым для ее работы данным.

Следует отметить, что для хранения информации по каждому параметру ПЧ с учетом их высокой вариантности («как задумано», «как спроектировано», «как изготовлено», «как существует при эксплуатации» и т.п.), в объект класса, отвечающего за их визуализацию, была введена специальная строчная переменная. В указанной переменной может располагаться практически любое по размеру множество значений каждого параметра, тем самым, обеспечивая в полной мере возможность хранения информации о ПЧ осевой турбины на протяжении всего ее жизненного цикла. Устанавливая указатель на тот или иной элемент из множества значений для каждого из параметров ИСТИМ ПЧ, мы получаем интересующий нас вариант информации о ПЧ любого этапа жизненного цикла.

Выводы

1. Разработан комплекс методов и алгоритмов, связанных с созданием и модификацией информационной модели проточной части осевой турбины.
2. Разработан формат метаданных, описывающих информационную модель проточной части.
3. Создана информационная модель ПЧ в виде единого динамического структурно-топологического шаблона.
4. Разработан эффективный механизм навигации по иерархически структурированному информационному пространству проекта.
5. Разработан и реализован метод, согласующий работу алгоритмической части мультидисциплинарных моделей расчета ПЧ непосредственно с данными из информационного пространства проекта.
6. Все разработанные методы и алгоритмы имплементированы в интегрированную САПР «Турбоагрегат».

Литература

1. Краснухин А. Методологии проектирования сложных изделий // Открытые системы.– 2003. – № 6. – http://citforum.univ.kiev.ua/consulting/articles/complex_projects/.
2. Кутейников М.А., Липис А.В., Машин А.В., Быков Г.В., Рыжов В.А., Петров А.В., Описание объекта в информационных системах, сопровождающих полный жизненный цикл судна // Информационно-аналитический журнал «Rational Enterprise Management». – 2006. – №1– С. 31–33.
3. Кизим А.В., Дворянкин А.М., Камаев В.А. Программно-информационный комплекс систем поддержки деятельности главного конструктора машиностроительного предприятия // Сетевой электронный научный журнал "Системотехника".– 2003. – №1. – <http://systech.miem.edu.ru/>.
4. Галкина О., Рындин А., Рябенский Л., Тучков А., Фертман И. Электронная информационная модель изделий судостроения на различных стадиях жизненного цикла // Электронный научный журнал CADmaster. – 2007. – №37.– С. 48–51. – <http://www.cadmaster.ru/>.

5. Иноземцев А.А., Нихамкин М.А., Сандрацкий В.Л. Серия учебников "Газотурбинные двигатели" для студентов специальности "Авиационные двигатели и энергетические установки". – <http://www.avid.ru/pr/uchebnik/>.
6. Бойко А.В., Говорущенко Ю.Н., Усатый А.П. Разработка информационной среды и средств динамического управления информационными моделями данных сложных технических объектов применительно к САПР «Турбоагрегат» // Тем. вип. «Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування» .–2006.– №5.– С. 36–42.
7. Бойко А.В., Говорущенко Ю.Н., Усатый А.П. Программная реализация единого информационного пространства интегрированной системы автоматизированного проектирования «Турбоагрегат» // Электронное моделирование. – Киев: Институт проблем моделирования в энергетике НАН Украины, 2009. – №2, том 31 – С. 43–55.
8. Гаазе-Рапопорт М.Г., Поспелов Д.А., Аверкин А.Н. Толковый словарь по искусственному интеллекту, Компьютерная версия: Листопад И.Н., Прокудин А.Б., Щербаков Е.Н. – <http://www.raai.org/library/tolk/aivoc.html>.
9. Extensible Markup Language (XML) 1.0// W3C Recommendations. W3C, 2004.– <http://www.w3.org/TR/2004/REC-xml-200440204/>.
10. Shanmugasundaram J., Kiernan J., Fan C., Funderburg J. XPERANTO: Querying XML Views of relational data. // IBM Almaden Research Center. San Jose. – 2001.
11. Новак Л.Г., Кузнецов С.Д. Свойства данных XML // Труды ИСП РАН. 4. М: ИСП РАН. – 2003. – с. 187.

Bibliography (transliterated)

1. Krasnuhin A. Metodologii proektirovaniya slozhnyh izdelij Otkrytye sistemy.– 2003. – # 6. – http://citforum.univ.kiev.ua/consulting/articles/complex_projects/.
2. Kutejnikov M.A., Lipis A.V., Mashin A.V., Bykov G.V., Ryzhov V.A., Petrov A.V., Opisanie ob"ekta v informacionnyh sistemah, soprovozhdajushhih polnyj zhiz-nennyj cikl sudna Informacionno-analiticheskij zhurnal «Rational Enterprise Management». – 2006. – #1– p. 31–33.
3. Kizim A.V., Dvorjankin A.M., Kamaev V.A. Programmno-informacionnyj kompleks sistem podderzhki dejatel'nosti glavnogo konstruktora mashinostroitel'no-go predpriyatiya Setevoj jelektronnyj nauchnyj zhurnal "Sistemotehnika".– 2003. – #1. – <http://systech.miem.edu.ru/>.
4. Galkina O., Ryndin A., Rjaben'kij L., Tuchkov A., Fertman I. Jelektronnaja informacionnaja model' izdelij sudostroenija na razlichnyh stadijah zhiznennogo cik-la Jelektronnyj nauchnyj zhurnal CADmaster. – 2007. – #37.– p. 48–51. – <http://www.cadmater.ru/>.
5. Inozemcev A.A., Nihamkin M.A., Sandrackij V.L. Serija uchebnikov "Gazoturbinnye dvigateli" dlja studentov special'nosti "Aviacionnye dvigateli i jener-geticheskie ustanovki". – <http://www.avid.ru/pr/uchebnik/>.
6. Bojko A.V., Govorushhenko Ju.N., Usatyj A.P. Razrabotka informacionnoj sredy i sredstv dinamicheskogo upravlenija informacionnymi modeljami dannyh slozhnyh tehni-cheskikh ob"ektov primenitel'no k SAPR «Turboagregat» Tem. vip. «Energetichni ta teplotehnichni procesi j ustatkuvannja» .–2006.– #5.– p. 36–42.
7. Bojko A.V., Govorushhenko Ju.N., Usatyj A.P. Programmnaia realizacija edino-go informacionnogo prostranstva integrirovanno-j sistemy avtomatizirovan-nogo proektirovaniya «Turboagregat» Jelektronnoe modelirovanie. – Kiev: Institut pro-blem modeljuvannja v energetici NAN Ukraïni, 2009. – #2, tom 31 – p. 43–55.

8. Gaaze-Rapoport M.G., Pospelov D.A., Averkin A.N. Tolkovyj slovar' po iskusstvennomu intellektu, Komp'juternaja versija: Listopad I.N., Prokudin A.B., Shher-bakov E.N. – <http://www.raai.org/library/tolk/aivoc.html>.
9. Extensible Markup Language (XML) 1.0 W3C Recommendations. W3C, 2004.– <http://www.w3.org/TR/2004/REC-xml-200440204/>.
10. Shanmugasundaram J., Kiernan J., Fan C., Funderburg J. XPERANTO: Querying XML Vies of relational data. IBM Almaden Research Center. San Jose. – 2001.
11. Novak L.G., Kuznecov S.D. Svojstva dannyh XML Trudy ISP RAN. 4. M: ISP RAN. – 2003. – p. 187.
УДК 621.165

Усатий О.П.

**ПРОТОЧНА ЧАСТИНА ОСЬОВОЇ ТУРБИНИ
ЯК ОБ'ЄКТ ІНТЕГРОВАНОГО ІНФОРМАЦІЙНОГО ПРОСТОРУ
САПР «ТУРБОАГРЕГАТ»**

В статті описано комплекс методів і алгоритмів, пов'язаних з розробкою й модифікацією інформаційної моделі проточної частини осьової турбіни. Запропоновано високоефективний механізм навігації по ієрархічному інформаційному простору проекту проточної частини. Розглянуто методи й алгоритми, що забезпечують роботу алгоритмічної частини мультидисциплінарних моделей розрахунку проточної частини осьової турбіни безпосередньо з даними із ієрархічно структурованого інформаційного простору проекту.

Usatyi A.P.

**FLOW PATH OF THE AXIAL TURBINE AS OBJECT OF THE INTEGRATED
INFORMATION SPACE CAD "TURBOAGGREGAT"**

In article the complex of methods and algorithms connected with development and improvement of information model of the axial turbine flow path is described. The high-performance mechanism of navigation on a hierarchical information space of the flow path project is proposed. Methods and algorithms ensuring operation of an algorithmic part of multidisciplinary calculation models of axial turbine flow path directly with data from the project hierarchically structured information space are considered.

ІНТЕГРОВАНА ГІБРИДНА ТЕХНОЛОГІЯ ПАРАЛЕЛЬНИХ ОБЧИСЛЕНЬ

Постановка проблеми. Головною рисою сучасного стану розвитку обчислювальних систем і їх компонентів є чітко визначена орієнтація на розвиток і застосування паралельних обчислювальних технологій. Саме такий підхід є максимально ефективним шляхом масштабування продуктивності обчислень у порівнянні з ще донедавна застосовуваним нарощуванням частоти роботи елементної бази і, зокрема, процесорів. Існує широке коло задач, пов'язаних з виконанням ресурсномістких обчислень при моделюванні різноманітних процесів, що потребує, зокрема, обробки та візуалізації значних обсягів інформації. Останнє часто ускладнюється необхідністю здійснення обробки інформації в масштабі реального часу, що потребує як значних комп'ютерних потужностей, так і відповідних алгоритмів, що спроможні їх ефективно утилізувати. Одним із активних споживачів надмірних комп'ютерних ресурсів є обчислювальна гідроаеродинаміка – одна з наймолодших галузей сучасної науки, яка протягом останнього півстоліття переживає інтенсивний розвиток, обумовлений різким зростанням потужності та доступності обчислювальної техніки та значним зменшенням собівартості обчислень. Нові обчислювальні можливості дозволяють формулювати нові постановки відомих актуальних задач, оскільки, як добре відомо, надмірна складність процесів, що протікають при русі рідини або газу суттєво обмежують можливості отримання аналітичних розв'язків лише досить простими розрахунковими випадками [1-3]. Саме тому підвищення досконалості математичних моделей разом із зростанням ефективності відповідних розрахункових методів залишається однією з найактуальніших задач у цій сфері досліджень. Сучасні задачі моделювання обтікання ґрунтуються на застосуванні чисельних методів інтегрування системи рівнянь Нав'є-Стокса або її спрощених варіантів. Нелінійність цієї системи та еліптичність за просторовими координатами рівнянь руху обумовлює необхідність використання ітераційних методів її розв'язування. Турбулентність, процеси хімічної та міжфазної взаємодії значно ускладнюють моделі течій, що вивчаються, і суттєво уповільнюють відповідні розрахункові методи. Тому шляхи розвитку обчислювальних методів і технологій в галузі гідроаеромеханіки безпосередньою мірою обумовлені потужністю та швидкістю наявної обчислювальної техніки і, перш за все визнаються задіяними методами нарощування продуктивності останньої. Спроба якомога кращої адаптації деяких існуючих класичних методів числових розрахунків до розгалужених архітектур сучасних кластерних комп'ютерних систем з багатопроекторними чи багатоядерними вузлами і складає загальну постановку проблеми даного дослідження.

Аналіз відомих здобутків у галузі побудови паралельних алгоритмів. Оскільки розвиток мікроелектронної елементної бази не встигає за практичними потребами, суттєвою можливістю підвищення продуктивності комп'ютерів є використання паралельних архітектур шляхом використання в одному комп'ютері не одного, а двох чи більшої кількості арифметичних пристроїв – процесорів. Відповідна архітектура отримала назву симетричної мультипроцесорності (SMP-Symmetric MultiProcessing). Сучасні технології розвитку мініатюризації мікросхем пропонують ще один інноваційний підхід – багатоядерні процесори, що містять в одному чипі кілька ідентичних арифметич-

них пристроїв – процесорних ядер (CMP – Chip-Level MultiProcessing). Сучасні обчислювальні пакети, орієнтовані на розв’язування задач моделювання течій, наприклад PHOENICS чи ANSYS, як правило, передбачають можливість їх застосування на багатопроцесорних або багатоядерних комп’ютерах. Але досягнення бажаного зростання швидкості проведення розрахунків шляхом орієнтації на обчислювальну техніку паралельної архітектури зіштовхується з рядом проблем. Традиційно, ефективність паралелізму нарощуванням кількості арифметичних пристроїв є обмеженою пропускну здатністю спільної оперативної пам’яті, що мусить, наскільки можливо, одночасно обробляти їхні паралельні запити. Тому найрозповсюдженіші конструктивні рішення містять не більш ніж 4 процесори, а сучасні процесори масового використання – не більш ніж 4 ядра.

Створення програм під такої архітектури ґрунтується на багатопоточній технології, яка є порівняльно нескладною і незатратною в процесі її виконання. Вона підтримується у тому чи іншому вигляді усіма сучасними компіляторами з найуживаніших мов програмування. Отже конструктивний фактор виступає як найсуттєвіший з тих, що гальмують можливості масштабування продуктивності обчислень на основі такого підходу. Водночас слід зауважити, що саме ця технологія масових багатопоточних обчислень у дещо адаптованому варіанті стала стандартом при обробці та побудові графічних зображень відеопроцесорами графічних карт і сьогодні інтенсивно поширюється фірмами-розробниками відеочипів (Nvidia, AMD (ATI)) на різноманітні прикладні обчислення не лише графічної сфери. Графічні ресурсомісткі обчислення сьогодні є вкрай прогресивними враховуючи сукупну обчислювальну продуктивність відеочипів, яка набагато перевищує можливості сучасних процесорів, але, враховуючи на досить усталену специфіку і обмежену кількість команд відеопроцесорів, відмінність способу їх взаємодії з відеопам’яттю і обмеженість останньої треба при програмуванні прикладних задач разом із потужностями графічної карти застосовувати також і ресурси головного процесора та оперативної пам’яті. Все це разом із потребою створення ефективного паралельного коду значно ускладнює прикладне програмування необхідністю досягнення ще й вдалого перерозподілу обчислювальної роботи між різними компонентами комп’ютера.

Інший підхід полягає в об’єднанні деякої кількості комп’ютерів швидкодіючим мережним інтерфейсом і застосування на цій розгалуженій системі однієї з існуючих технологій розподілених обчислень. Одним з прообразів таких систем був проект Beowulf, започаткований в 1993 р. Ця архітектура отримала назву мультикомп’ютерної або кластерної (MPP – Massively Parallel Processing) і набула популярності через порівняльну дешевизну її стандартних компонентів та гарну спроможність до нарощування ресурсів, оскільки збільшення кількості арифметичних пристроїв супроводжується пропорційним зростанням розподіленої оперативної пам’яті. Сьогодні це один із популярних шляхів масштабування продуктивності обчислень, через що близько 60 % найпотужніших суперкомп’ютерів світу втілюють саме кластерний принцип побудови. Найсуттєвіший недолік тут впливає саме з необхідності адресації масиву розподіленої пам’яті і потреби забезпечити при розв’язанні задачі ефективний обмін проміжними даними між вузлами кластерної системи. У зв’язку з цим до мережного інтерфейсу висуваються вимоги не лише високої швидкодії, а й мінімізації затримок (низької латентності) при передачі даних між вузлами, що часто обумовлює його досить складну розгалужену між вузлами топологію. Різниця в принципі побудови двох розглянутих вище архітектур вимагає різних підходів до алгоритмізації та програмування задачі. Сучасні

кластерні системи є комбінаціями цих архітектур, оскільки кожен з вузлів, як правило, містить кілька багатоядерних процесорів, що робить кластерну установку компактнішою та зменшує навантаження на мережу через зниження сукупних обсягів потоків обміну даними між вузлами. Програмування ж задач традиційно здійснюється за принципами, прийнятими для розподілених систем, згідно яких кілька процесорів одного вузла чи навіть кілька ядер одного процесора обробляють незалежні процеси, кожен з яких опрацьовує відповідну ділянку виділеної йому спільної у даному випадку оперативної пам'яті як ізольовану від інших. Обмін між цими суміжними ділянками здійснюється через мережний інтерфейс, на що непродуктивно використовуються ресурси процесорів, які разом з неминучими затримками у результаті цієї передачі призводять до падіння продуктивності обчислювальної системи у цілому.

У цьому зв'язку набуває актуальності проведення досліджень з метою узгодження існуючих принципів багатопоточного та розподіленого програмування та їх адаптації до комбінованої архітектури сучасних обчислювальних кластерів.

Метою даної роботи є оцінювання ефективності застосування комбінованого методу розпаралелювання обчислень, що втілює елементи програмування, орієнтовані на архітектури як MPP, так і SMP (CMP) обчислювальних систем для двох класичних задач обчислювальної математики та гідроаеромеханіки, а саме: а) розв'язування систем лінійних алгебраїчних рівнянь (СЛАР) великих порядків, і б) моделювання течії в'язкої нестисливої рідини, що формується в замкненій порожнині у формі прямокутного паралелепіпеда. Варто зауважити, що значною мірою ці обидві задачі пов'язані між собою, оскільки при використанні числових методів, які ґрунтуються на скінченно-різницевій апроксимації диференціальних рівнянь, задача розв'язування останніх замінюється задачею знаходження значень шуканих функцій у вузлових точках різницевої сітки шляхом відшукування розв'язку СЛАР. Відмінність полягає у тому, що в останньому випадку при побудові методу розрахунку можна, як правило, ефективно використати особливості структури отриманих у результаті скінченно-різницевої дискретизації матриць СЛАР і застосувати відповідні економічні числові методи.

Методика дослідження полягає в плануванні та здійсненні числового експерименту з порівняльної оцінки ефективності багатопоточного (SMP чи CMP орієнтованого), розподіленого (MPP орієнтованого) та комбінованого алгоритмів при змінній навантаженості наявних обчислювальних ресурсів і використанні кількох конфігурацій мережевого інтерфейсу з різною пропускнуою здатністю.

Стисла характеристика використаної кластерної установки. У даному дослідженні використано кластерну систему, побудовану з вісьмох вузлів, об'єднаних мережею топології "зірка", яку склали гігабітні PCI мережні карти виробництва Intel PRO/1000MT та комутатор D-Link DGS-1008D (Gigabit Ethernet) або D-Link DES-1008D(Fast Ethernet)). Кожен з них містив двоядерний процесор AMD Athlon 64 X2 3800+ з тактовою частотою 2.0 ГГц та 2 ГБ оперативної пам'яті DDR-400, яка працювала у двоканальному режимі. Кластер працював під керуванням операційної системи Windows XP x64, а міжвузловий інтерфейс забезпечувався пакетом MPICH2 (ver. 1.1b1).

Задача розв'язування СЛАР великого порядку. Задача розв'язування СЛАР великого порядку. Розглянемо неоднорідну СЛАР, задану N рівняннями виду:

$$\sum_{j=1}^N a_{ij}x_j = b_i, \quad (1)$$

де $i = \{1, \dots, N\}$ – номер рівняння, $j = \{1, \dots, N\}$ – номер невідомої; a_{ij} , b_j – коефіцієнти та вільні члени СЛАР; x_j – невідомі.

Як відомо, для систем великого порядку ($N > 1000$) внаслідок помилок округлення прямі методи перестають бути ефективними і є доцільність у використанні методів ітераційного розв'язання СЛАР. Згідно одному з них – методу Гауса-Зейделя, який одночасно втілює простоту і ефективність розрахункового алгоритму, невідомі відшукуються за правилом

$$x_j^k = \begin{cases} \frac{1}{a_{jj}} \left(b_j - \sum_{m=j+1}^N a_{jm} x_m^{k-1} \right) & \text{при } j=1; \\ \frac{1}{a_{jj}} \left(b_j - \sum_{m=1}^{j-1} a_{jm} x_m^k - \sum_{m=j+1}^N a_{jm} x_m^{k-1} \right) & \text{при } 1 < j < N; \\ \frac{1}{a_{jj}} \left(b_j - \sum_{m=1}^{j-1} a_{jm} x_m^k \right) & \text{при } j=N, \end{cases} \quad (2)$$

що застосовується послідовно до кожного з рівнянь $j = \{1, \dots, N\}$ і нескладно алгоритмізується при створенні послідовного коду. Верхнім індексом k тут позначено номер поточної ітерації. При розробці паралельного алгоритму розіб'ємо СЛАР на рівні частини згідно кількості доступних вузлів (процесорів чи ядер) R . Число рівнянь у кожній з них дорівнюватиме $S = \text{int}(N/R)$. При нецілому діленні остання частина рівнянь СЛАР коригується таким чином, щоб включити останнє рівняння системи з номером N .

Багатопоточна реалізація розпаралелювання ітераційного розв'язання СЛАР. Алгоритмізація і програмування паралельного методу обчислення на комп'ютері симетричної мультипроцесорної (SMP) архітектури (тобто при наявності кількох процесорів чи процесорних ядер, які опрацьовують розміщені в спільній оперативній пам'яті дані) спираються на технологію генерації потрібної кількості потоків, кожен з яких обробляє відповідну частину рівнянь СЛАР. Як правило, кількість потоків повинна відповідати числу наявних (або доступних) для використання процесорних елементів чи ядер. Ніяких додаткових витрат окрім виділення програмою R потоків тут не передбачається. Самі ж ці витрати є вкрай незначними у порівнянні з часом виконання цими потоками обчислювальної роботи по обробці рівнянь $i = \{L, \dots, L+S\}$ (L – номер потоку) за формулою (2) за умови, що порядок СЛАР не є досить малим. Таким чином, при алгоритмізації і програмуванні задачі розв'язання СЛАР за методом Гауса-Зейделя з розрахунком на багатопоточну технологію можна очікувати на близьку до ідеальної її реалізацію з точки зору ефективності розпаралелювання. При існуванні можливості задіяти технологію HyperThreading, що розробляється і удосконалюється компанією Intel, можна очікувати ще більш ефективної додаткової утилізації наявних процесорних ресурсів. Проблема масштабування цієї технології полягає лише в обмеженій кількості арифметичних пристроїв (процесорів чи їх ядер), що можуть при такому підході бути одночасно задіяні, а основним джерелом гальмування її ефективності тут виступатиме обмежена пропускну спроможність каналу процесори (ядра) – оперативна пам'ять.

Реалізація паралельного ітераційного розв'язання СЛАР на МРР комп'ютерах розподіленої архітектури (кластерах). Розглянемо більш ретельно випадок алгоритмізації цього ж методу при застосуванні кластерної обчислювальної системи з розгалуженими процесорами і оперативною пам'яттю. Припустимо аналогічно попередньому випадку, що кількість вузлів обчислювального кластера також дорівнює R . У цьому випадку кожна з R частин СЛАР обробляється окремо обчислювальним процесом, що генерується на відповідному вузлі кластера. У цьому випадку вектор поточних значень невідомих x_j^{k-1} , $j = \{1, \dots, N\}$ з попередньої ітерації на ітерації k мусить паралельно бути доступним для усіх процесів (вузлів), але уточнюватися він може кожним із процесів шляхом використання вже здобутої на поточній ітерації k інформації лише частково – виключно в межах відповідної частини рівнянь, що опрацьовується кількома потоками конкретного процесу за умови багатопроцесорних чи багатоядерних вузлів кластера, тобто окремо для кожного набору $j = \{M, \dots, M + S\}$ (M – номер процесу). Таким чином, реалізувати у повному обсязі перевагу методу Гауса-Зейделя перед методом Якобі тут вже є можливим лише частково, тобто лише в межах кожного з вузлів. Метод Якобі, як відомо, не використовує на поточній ітерації k вже уточнених значень невідомих x_j^k , тобто базується на наступній формулі

$$x_j^k = \frac{1}{a_{jj}} \left(b_j - \sum_{m=1}^{j-1} a_{jm} x_m^{k-1} - \sum_{m=j+1}^N a_{jm} x_m^{k-1} \right), \quad (3)$$

а спроба його адаптації під розгалужену кластерну архітектуру з багатопроцесорними чи багатоядерними вузлами приводить до наступної модифікації

$$\begin{aligned} x_j^k &= \frac{1}{a_{jj}} \left(b_j - \sum_{m=1}^{j-1} a_{jm} x_m^{k-1} - \sum_{m=j+1}^N a_{jm} x_m^{k-1} \right) \text{ при } j = M; \\ x_j^k &= \frac{1}{a_{jj}} \left(b_j - \sum_{m=1}^{M-1} a_{jm} x_m^{k-1} - \sum_{m=M}^{j-1} a_{jm} x_m^k - \sum_{m=j+1}^N a_{jm} x_m^{k-1} \right) \text{ при } M < j < M + S; \\ x_j^k &= \frac{1}{a_{jj}} \left(b_j - \sum_{m=1}^{M-1} a_{jm} x_m^{k-1} - \sum_{m=M}^{M+S} a_{jm} x_m^k - \sum_{m=M+S+1}^{j-1} a_{jm} x_m^{k-1} - \sum_{m=j+1}^N a_{jm} x_m^{k-1} \right) \\ &\text{при } M + S < j = N. \end{aligned} \quad (4)$$

Отже, при розв'язуванні СЛАР кластерною обчислювальною системою отримуємо дещо уповільнений алгоритм (4), який займатиме по ефективності проміжне положення між алгоритмами методу Гауса-Зейделя (2) і Якобі (3). Ефективність врахування вже здобутої на поточній ітерації інформації буде тим меншою, чим більша кількість процесів використовуватиметься при проведенні обчислень і навпаки, тим більшою, чим більша кількість потоків у межах кожного з процесів буде задіяною. Водночас, слід зауважити, що найсуттєвішим технологічним обмеженням багатопоточної технології паралельних обчислень може виступити пропускна здатність каналу процесор-

оперативна пам'ять. З іншого боку, реалізація розгалуженого алгоритму, орієнтованого під розподілену кластерну архітектуру, передбачає після здійснення кожної з ітерацій необхідність передачі отриманою кожним процесом (вузлом) інформації по уточненню частини значень x_j^k , $j = \{1, \dots, N\}$ решті процесів, що також зумовлює додаткові витрати як часу так і процесорних ресурсів для реалізації цього обміну даними.

З наведених двох концептуально різних принципів реалізації паралелізму ітераційного розв'язання СЛАР при орієнтації на системи з SMP та розподіленою (кластерною) архітектури впливає висновок про те, що як при застосуванні багатопоточних алгоритмів, так і при використанні технологій розподілених обчислень існують різні за природою виникнення джерела гальмування процесу паралельних обчислень. Враховуючи на те, що сьогодні спостерігається інтенсивний розвиток багатоядерних технологій процесоробудування і їх конвергенція з традиційними кластерними архітектурами, вузли яких стають не лише багатопроцесорними, що досить типово, а й багатоядерними, є актуальним враховувати ці тенденції і нові архітектурні особливості, а також оцінити додаткові витрати, обумовлені розгалуженням алгоритму. Для вирішення цієї задачі було створено програму мовою Fortran, що реалізує розбиття системи заданого порядку N на частини, які у свою чергу обробляються відповідними процесами згідно формули (4). Передачу інформації між процесами реалізовано шляхом використання інструкцій інтерфейсу передачі повідомлень (Message Passing Interface – MPI). Для трансляції програми у виконавчий код використовувався компілятор, розроблений компанією Intel (ver. 11).

Результати дослідження ефекту розпаралелювання при розв'язанні СЛАР. При виконанні дослідження використовувалася наступна стратегія: коефіцієнти СЛАР генерувалися випадковим чином, для полегшення аналізу ефективності обчислень і мінімізації впливу порядку СЛАР та описаної вище неможливості реалізувати алгоритм Гауса-Зейделя при розподілених обчисленнях у повній мірі, замість умови виходу з ітераційного процесу по досягненню наперед заданої точності використовувалася умова здійснення фіксованого числа ітерацій $k = 1000$. Кожен розрахунок здійснювався п'ять разів, після чого знаходилося середнє арифметичне здобутих результатів. Першим етапом дослідження, представленим рис. 1, було визначення ефективності розпаралелювання за технологією MPI при розв'язанні СЛАР у залежності від її порядку, яка оцінювалася кількісно коефіцієнтом прискорення, тобто часткою часу, необхідного для проведення обчислень за паралельним алгоритмом по відношенню до послідовного алгоритму розв'язування тієї самої задачі. З метою забезпечення більш наочного аналізу витрат, обумовлених мережевим інтерфейсом, при аналізі ефективності розв'язання СЛАР на цьому етапі дослідження використовувався Fast Ethernet (100 Mbps/s). З наведеної ілюстрації випливає, що застосування технології MPI розпаралелювання не є ефективним при порядках СЛАР, менших за 1000. При $N = 2000$ максимальний ефект від застосування розпаралелювання дорівнював подвійному прискоренню обчислень при 3-х задіяних процесорах, але подальше їх збільшення до 4-х ситуації не покращувало, а подальше збільшення кількості використаних процесорів призводило до деякого (близько 10 %) погіршення найкращого результату.

Описаний ефект немонотонної поведінки залежності коефіцієнта прискорення від кількості використаних процесорів спостерігається і для більших порядків СЛАР ($N = 4000, 6000$), але екстремум зростає і зсувається в напрямку більшої кількості процесорів. Отже збільшення порядку СЛАР є сприятливим фактором для більш ефективної реалізації технологій паралельних обчислень на розподіленій системі. При $N = 7000$ можна спостерігати в усьому дослідженому діапазоні восьми процесорів монотонне з незначним відхиленням від лінійної залежності зростання ефективності обчислень. Але, навіть і в цьому випадку, якщо при числі процесорів $R = 2$ маємо прискорення в 1.7 разів, тобто витрати на реалізацію технології паралелізму обчислень складають 30 %, то при використанні $R = 8$ процесорів втрати вже становлять 43.5 %, що обумовлено як зростанням кількості операцій обміну, так і більшим сукупним обсягом даних, що передаються між вузлами кластеру і обумовленою цим додатковою завантаженістю процесорів, які замість розв'язання прикладної задачі здійснюють додаткові операції по обслуговуванню її належного функціонування на розподіленій обчислювальній системі.

Більш детальну інформацію стосовно протікання процесів міжвузлового обміну даними можна отримати з аналізу завантаженості мережного інтер-фейсу (Fast Ethernet) при розв'язанні даної задачі, представленої на рис. 2 (другий етап дослідження). Ці дані знімалися одночасно на кількох вузлах з диспетчеру задач Windows XP безпосередньо в процесі проведення обрахунків.

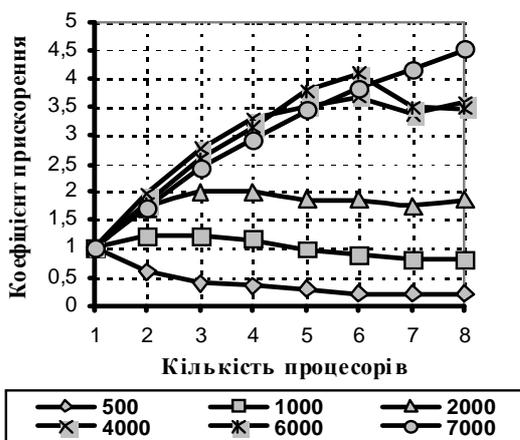


Рисунок 1 – Порівняння залежності коефіцієнту прискорення обчислень від кількості задіяних процесорів при розв'язанні СЛАР різного порядку шляхом застосування MPI технології паралельного програмування (Fast Ethernet)

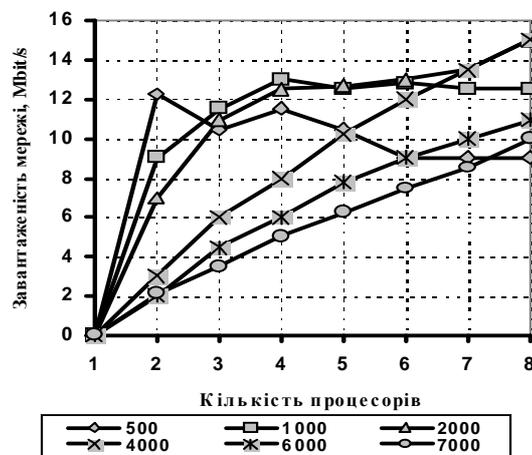


Рисунок 2 – Порівняння залежності завантаженості мережі Fast Ethernet від кількості задіяних процесорів при розв'язанні СЛАР різного порядку шляхом застосування MPI технології паралельного програмування

З наведеного співставлення випливає, що мережа при $R \leq 8$ процесорів не використовує більш ніж 15 % своєї максимальної пропускної здатності в усьому діапазоні досліджених порядків СЛАР, але збільшення порядку призводить до більш лінійної залежності між завантаженістю мережі та кількістю задіяних процесорів. При значних порядках СЛАР $N \geq 4000$ спостерігається тенденція поступового зменшення завантаженості мережі при одному і тому ж числі використаних процесорів $R = const$, що,

скоріше за все, обумовлено зростанням сукупного часу на здійснення однієї ітерації у порівнянні з долею часу, що витрачається мережею на міжвузловий обмін.

Ще однією дослідженою вагомою характеристикою стала завантаженість процесора під час процесу паралельного розв'язання СЛАР різних порядків при різній кількості задіяних процесорів (третій етап дослідження). Відповідні результати (рис. 3), як і у попередньому випадку, знімалися безпосередньо в процесі проведення обрахунків одночасно на кількох вузлах з диспетчеру задач Windows XP.

Отримані результати дають змогу пояснити причину низької ефективності розв'язання СЛАР порівняльно невисокого порядку ($N \leq 2000$) при зростанні кількості використаних процесорів. У цьому випадку спостерігається різке падіння завантаженості процесорів, яке вже при $R \geq 4$ не перевищує 55 %, тобто розподілена задача неспроможна завантажити усі процесори обчисленнями і вони переважно простоюють між ітераціями, очікуючи завершення порівняльно повільних операцій міжвузлового обміну, який, як це слідує з рис. 2, також не в змозі завантажити мережевий інтерфейс більш ніж на 12–15 %. Збільшення порядку СЛАР ($N \geq 4000$) є сприятливим щодо утилізації ресурсів процесора, оскільки співвідношення між витратами часу, необхідними для проведення обчислень і для здійснення міжвузлового обміну, схиляється в бік перших. У результаті сукупна завантаженість процесора зростає і негативна роль витрат, обумовлених операціями міжвузлової передачі даних, зменшується.

Збільшення числа задіяних процесорів у випадку великих порядків СЛАР ($N \geq 4000$) призводить до практично лінійного зменшення завантаженості процесорних ресурсів кластера, але, як це слідує з рис. 3, втрати процесорної ефективності при $R = 8$ не перевищують 40 %.

Таким чином, отримані результати дозволяють проаналізувати внесок досліджених складових витрат комп'ютерних ресурсів в ефективність розв'язування СЛАР ітераційним методом Гауса-Зейделя і дійти висновку про те, що більшої ефективності і на більшій кількості процесорів можна очікувати від розпаралелювання при зростанні порядку СЛАР. Зменшити витрати обчислювальної ефективності кластера можна при якомого більшому використанні мультипроцесорних чи багатоядерних потужностей кожного з вузлів шляхом застосування багатопоточних технологій програмування поряд з методами розподілених обчислень, що сприятиме мінімізації міжвузлового обміну даними і, як наслідок, збільшенню ефективності функціонування паралельних алгоритмів.

Наступний етап дослідження стосувався здійснення тих самих обрахунків, але при заміні комутації вузлів з Fast Ethernet на більш продуктивний Gigabit Ethernet (1000 Mbps). Окрім вдсятеро більшої пропускної здатності він характеризується ще й меншою латентністю, що позитивно впливає на взаємодію вузлів при розв'язуванні паралельної задачі. Рис. 4–6 наочно ілюструють результат цього ефекту, оскільки коефіцієнт прискорення обчислень (рис. 4) вже демонструє зростання починаючи вже з $N \geq 1000$, а не $N \geq 4000$, як це було для Fast Ethernet комунікаційного інтерфейсу. При кількості задіяних процесорів $R = 5$ значення коефіцієнта прискорення при $N = 7000$ збільшилося з 3.44 для Fast Ethernet до 4.55 для Gigabit Ethernet, отже втрати на реалізацію паралелізму для цього розрахункового випадку зменшилися з 31.2 % до 9 % виключно за рахунок зміни продуктивності інтерфейсу обміну між вузлами.

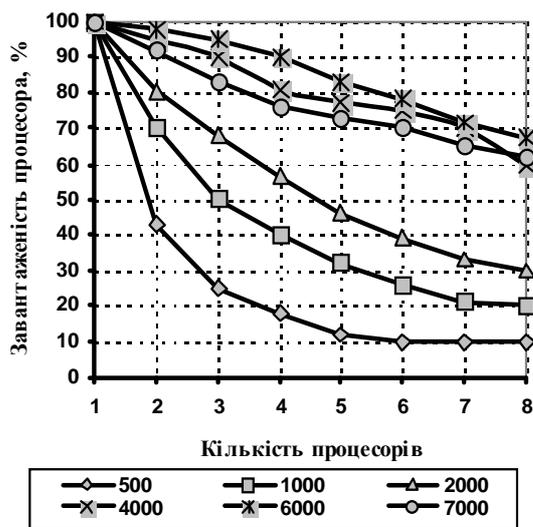


Рисунок 3 – Порівняння залежності завантаженості процесора від кількості задіяних процесорів при розв'язанні СЛАР різного порядку шляхом застосування MPI технології паралельного програмування (Fast Ethernet)

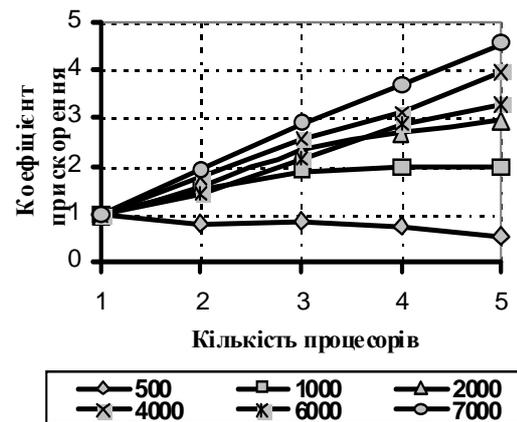


Рисунок 4 – Порівняння залежності коефіцієнту прискорення обчислень від кількості задіяних процесорів при розв'язанні СЛАР різного порядку шляхом застосування MPI технології паралельного програмування (Gigabit Ethernet)

Залежності набули більш лінійного вигляду, отже продуктивність обчислень зростає в більшій мірі пропорційно до кількості задіяних процесорів. Одночасно суттєво (до 7.7 разів при $R = 5$) зросла інтенсивність обміну даними між вузлами, що ілюструється рис. 5. При максимально теоретично можливому відношенні у 10 разів, що визначається гранично можливими специфікаціями використаних мережних інтерфейсів, отриманий показник є обнадійливим позитивним результатом.

Більш ефективна взаємодія знаходить своє безпосереднє віддзеркалення і в різкому зростанні завантаженості процесорів, що демонструє рис. 6. Якщо для СЛАР з $R = 5$ процесори відпрацьовували лише 83 % своєї максимальної продуктивності за умови використання Fast Ethernet, то заміна останнього на Gigabit Ethernet забезпечує вже 95 % утилізації ресурсів процесорів, тобто у цьому випадку мережевий інтерфейс вже в значно меншій мірі стає вузьким місцем технології розподілення обчислень при ітераційному розв'язанні СЛАР.

Отже, усі компоненти обчислювальної кластерної системи при застосуванні більш швидкодіючого інтерфейсу працюють більш злагоджено.

Подальшу перевірку цього результату буде здійснено шляхом розгляду більш конкретної аерогідродинамічної задачі.

Постановка задачі, вихідні рівняння. Розглянемо течію в'язкої нестисливої рідини, що формується в замкненій порожнині у формі прямокутного паралелепіпеда. Верхня кришка порожнини вважається рухомою, швидкість її руху u_H є сталою заданою величиною. В результаті в порожнині утворюється циркуляційний рух рідини, що її заповнює, властивості якого залежать від геометричних особливостей і режимних параметрів формування течії, і, зокрема, від кута, під яким рухається верхня кришка по відношенню до бічних граней порожнини. Обмежимо розгляд ламінарним режимом і порівняльно невеликим значенням числа Рейнольда ($Re = 200$), що дозволить уникнути проблем, пов'язаних із забезпеченням збіжності ітераційних розрахункових процедур і зосередитися на побудові розгалужених алгоритмів обчислень.

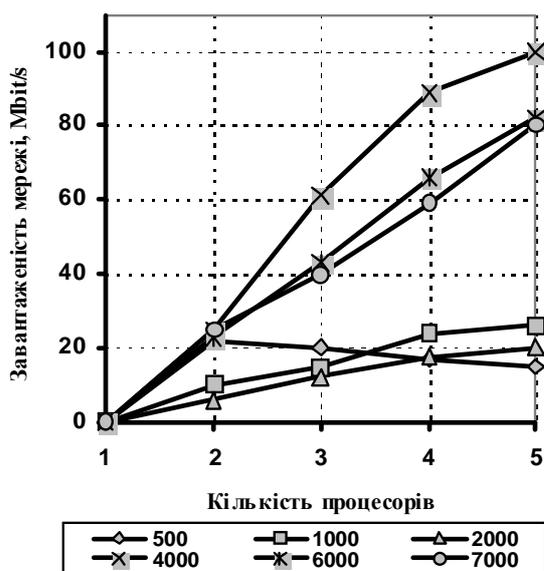


Рисунок 5 – Порівняння залежності завантаженості мережі Gigabit Ethernet від кількості задіяних процесорів при розв'язанні СЛАР різного порядку шляхом застосування MPI технології паралельного програмування

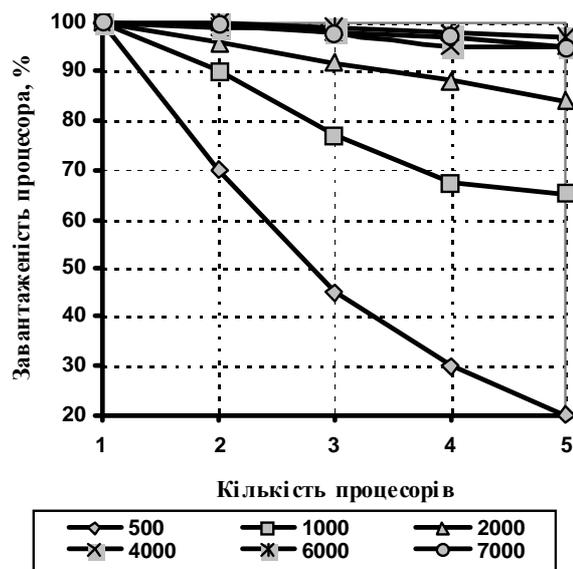


Рисунок 6 – Порівняння залежності завантаженості процесора від кількості задіяних процесорів при розв'язанні СЛАР різного порядку шляхом застосування MPI технології паралельного програмування (Gigabit Ethernet)

Числове розв'язування цієї задачі ґрунтується на системі рівнянь Нав'є-Стокса, яка в просторовій декартовій системі координат (x, y, z) після перетворень, притаманних методу SIMPLE (Semi Implicit Method for Pressure-Linked Equations), може бути подана у наступній узагальненій формі:

$$\frac{\partial}{\partial x} A_x \bar{\varphi} + \frac{\partial}{\partial y} A_y \bar{\varphi} + \frac{\partial}{\partial z} A_z \bar{\varphi} = S_\varphi + \frac{\partial}{\partial x} \left(F \frac{\partial \bar{\varphi}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(F \frac{\partial \bar{\varphi}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(F \frac{\partial \bar{\varphi}}{\partial z} \right), \quad (5)$$

де $\varphi = \{u, v, w, p\}$ – узагальнена розрахункова змінна; A_x, A_y, A_z – коефіцієнти конвективного переносу в напрямках відповідних координатних осей x, y, z ; F – дифузійний коефіцієнт; S_φ – джерельний член. Обезрозмірення декартових координат x, y, z проводиться по характерному розміру розрахункової області L , за який прийматимемо висоту порожнини, а саме: $\bar{x} = x/L, \bar{y} = y/L, \bar{z} = z/L$. Отже, просторова розрахункова область D характеризуватиметься значеннями: $0 \leq x \leq x_{\max}, 0 \leq y \leq y_{\max}, 0 \leq z \leq L$. Обезрозмірення компонент швидкості є наступним: $\bar{u} = u/u_H, \bar{v} = v/u_H, \bar{w} = w/u_H$, тиск обезрозмірюється згідно формули $\bar{p} = p/\rho u_H^2$, де ρ – густина. Параметри рівняння визначаються залежно від розрахункової змінної згідно таблиці 1.

Система визначених таблицею 1 чотирьох рівнянь розв'язується з наступними граничними умовами:

На обтічних поверхнях (стінках порожнини):

$$\bar{u} = 0, \bar{v} = 0, \bar{w} = 0. \quad (6)$$

Таблиця 1 – Структурні елементи рівняння (5)

Φ	A_x	A_y	A_z	F	S_Φ
u	\bar{u}	\bar{v}	\bar{w}	$\bar{v} = \frac{1}{\text{Re}}$	$-\frac{\partial \bar{p}}{\partial x}$
v	\bar{u}	\bar{v}	\bar{w}	$\bar{v} = \frac{1}{\text{Re}}$	$-\frac{\partial \bar{p}}{\partial y}$
w	\bar{u}	\bar{v}	\bar{w}	$\bar{v} = \frac{1}{\text{Re}}$	$-\frac{\partial \bar{p}}{\partial z}$
p'	0	0	0	1	За методом SIMPLE

На кришці з урахуванням її рухомості:

$$\bar{u} = \bar{u}_{Hx} = \text{const}, \quad \bar{v} = 0, \quad \bar{w} = \bar{u}_{Hz} = \text{const}. \quad (7)$$

Тиск визначається в процесі ітераційного відшукування розв'язку за методом SIMPLE.

Математичні подробиці побудови паралельних алгоритмів. Зв'яжемо осі координат з ребрами порожнини і покриємо просторову розрахункову область D сіткою, в вузлах якої будемо обчислювати значення розрахункових змінних. Для даної модельної задачі з метою спрощення використаємо рівномірну сітку, причому кількість вузлів сітки в обох напрямках візьмемо однаковою. Розіб'ємо побудовану сітку на блоки вздовж останнього напрямку z так, щоб вузли на межах блоків перекривалися, тобто межовий вузол одного блоку є внутрішнім для сусіднього з ним і навпаки. Скінченно-різницеву апроксимацію рівняння (5) для кожної зі змінних представимо на п'ятиточковому шаблоні і організуємо для кожного з рівнянь системи (табл. 1) послідовний обхід всіх внутрішніх точок для окремо виділеного блоку згідно розрахункової процедури SIMPLE. На кожному кроці ця процедура виконується для кожного з блоків, а межові значення розрахункових змінних корегуються залежно від використаної технології розпаралелювання. У дослідженні одночасно використано два підходи: OpenMP [5] та MPI [6]. Перший з них (OpenMP) орієнтований на багатопоточне програмування і є ефективним в багатопроесорних чи багатоядерних системах. Другий підхід (MPI – Message Passing Interface) є ефективним для розподілених обчислювальних систем (кластерів). Ці технології є принципово відмінними і, певною мірою, конкуруючими.

У даній роботі здійснено спробу їх узгодження шляхом комбінування (рис. 7), при якому уся розрахункова область ділиться пропорційно кількості вузлів кластера і утворені підобласті обробляються відповідними процесами інтерфейсу MPI з притаманним йому міжвузловим обміном проміжними результатами обчислень на внутрішніх суміжних межах.

У свою чергу, кожна з цих підобластей ділиться пропорційно кількості арифметичних пристроїв вузла, що визначається добутком кількості процесорів у вузлі та кількості ядер кожного процесора. Кожен з цих елементів області опрацьовується відповідним ядром процесора шляхом генерації OpenMP потоків, які, на відміну від MPI процесів, працюють зі спільною оперативною пам'яттю кластерного вузла і тому не потребують обміну даними між собою. Такий підхід, на відміну від реалізації традиційної стратегії виключно MPI програмування (як це було виконано вище для СЛАР), дозволяє уникнути додаткових витрат ресурсів і затримок, обумовлених непродуктивним і зайвим у цьому випадку обміном даних в межах кожного з вузлів кластерної системи.

Загальна характеристика застосованої кластерної установки. Для проведення даного етапу досліджень використано кластерну систему, побудовану з п'ятьох вузлів, об'єднаних гігабітною мережею. Кожен з них містить двоядерний процесор Intel Core 2 Duo E6400 з тактовою частотою 2.13ГГц та 2 ГБ оперативної пам'яті DDR2-800. Для тестування суто багатопоточної OpenMP технології було застосовано комп'ютер на базі чотирьохядерного процесора Intel Core 2 Quad Q6600 з тактовою частотою 2.4 ГГц та 4 ГБ оперативної пам'яті DDR2-800.

Результати досліджень. Проаналізуємо особливості реалізації кожної з розглянутих вище технологій розпаралелювання стосовно сформульованої задачі. На рис. 8 представлені результати обчислень даної задачі за OpenMP технологією, збільшення потужності сітки (трикутники – 102 вузли в кожному напрямку; квадрати – 202 вузли; кола – 302 вузли; ромби – 402 вузли).

Як це впливає з отриманих даних, збільшення обсягів обчислень погіршує ефективність розпаралелювання розрахунків, яке тут, як і раніше, оцінювалося коефіцієнтом прискорення. Пояснення цього ефекту полягає в тому, що при зростанні обчислювальної роботи збільшується і кількість даних, які знаходяться в оперативній пам'яті і одночасно опрацьовуються усіма потоками, що обмежується пропускнуою здатністю каналу процесор-оперативна пам'ять.

При застосуванні суто MPI технології та проведенні розрахунків на відповідній розподіленій кластерній системі маємо протилежну тенденцію (рис. 9, 10, трикутники): коефіцієнт прискорення обчислень зростає по мірі збільшення розмірності задачі. Тлумачення цього результату полягає в тому, що при збільшенні кількості вузлів n в кожному з напрямків навантаження на обчислювальні ресурси вузла зростає пропорційно n^3 , а міжвузловий обмін даними з суміжних граней під областями збільшується лише пропорційно n^2 . Отже, доля ресурсів, яку треба витратити на непродуктивний, але необхідний елемент цієї технології неухильно зменшується в обсязі усієї обчислювальної роботи по мірі зростання потужності сітки.

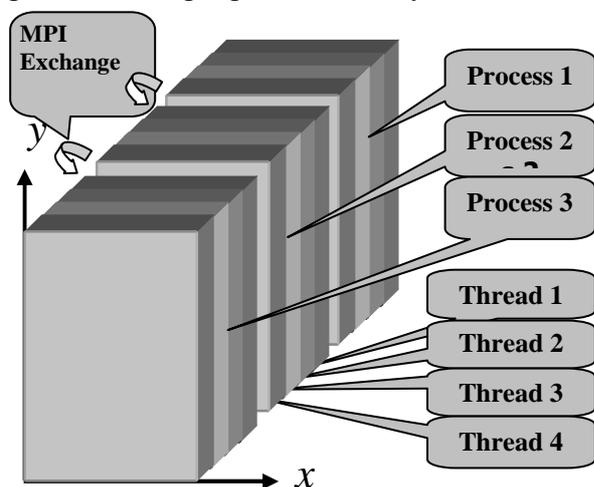


Рисунок 7 – Комбінована декомпозиція розрахункової області при використанні MPI та OpenMP технологій паралельних обчислень

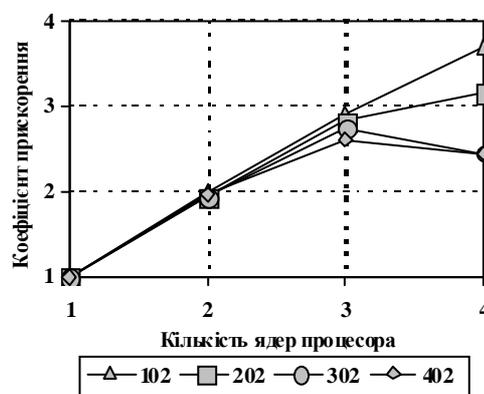


Рисунок 8 – Залежність коефіцієнту прискорення обчислень від розмірності сітки та кількості задіяних ядер процесора при реалізації OpenMP технології багатопоточного програмування

Реалізована у даному дослідженні ідея автора по побудові гібридного алгоритму, який містить в собі дві проаналізовані вище технології, як це впливає з рис. 9, 10 (кола), виявилася спроможною одночасно використати переваги і нівелювати недоліки двох її складових.

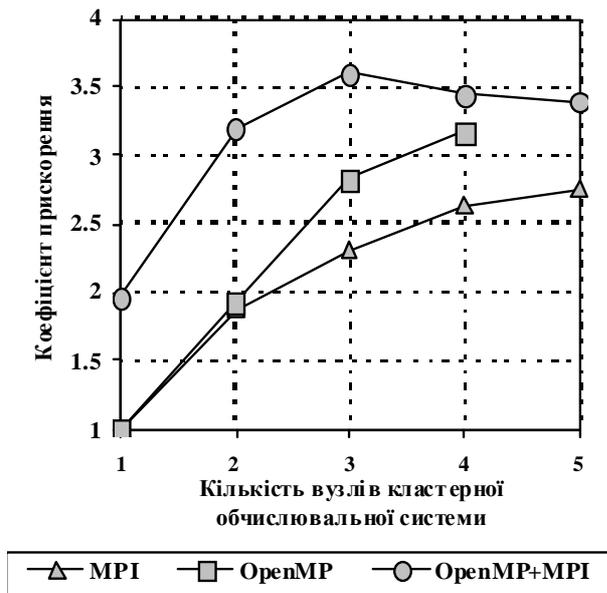


Рисунок 9 – Порівняння залежності коефіцієнту прискорення обчислень при реалізації різних технологій паралельного програмування: MPI, OpenMP та OpenMP+MPI $N = 202^3$ вузлів

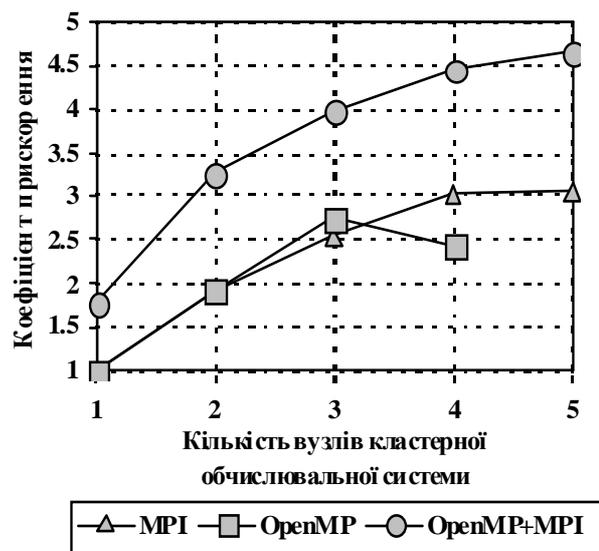


Рисунок 10 – Порівняння залежності коефіцієнту прискорення обчислень при реалізації різних технологій паралельного програмування: MPI, OpenMP та OpenMP+MPI. $N = 302^3$ вузлів

За рахунок використання в межах вузла лише OpenMP підходу, вдається, як значалося вище, зменшити непродуктивний обмін даними, а також знизити навантаження на процесори та мережний інтерфейс шляхом мінімізації міжвузлового обміну даними. З іншого боку, завдяки використанню MPI декомпозиції, зменшується навантаження на кожен з вузлів кластера, результатом чого є зростання ефективності багатопоточної обробки. Таким чином, розроблений гібридний OpenMP+MPI підхід до розпаралелення обчислень є більш ефективним у порівнянні з кожною з технологій, застосованих окремо. З наведених на рис. 9, 10 результатів слідує, що на п'ятивузловому кластері з двоядерними вузлами вдалося отримати прискорення розв'язування задачі моделювання течії в просторовій порожнині в 4,66 разів при загальній кількості вузлів сітки $27,5 \cdot 10^6$.

Висновки

1. Проаналізовано ефективність розпаралелювання ітераційного методу розв'язування СЛАР по завантаженню процесорів, комунікаційного інтерфейсу та коефіцієнту прискорення обчислень у цілому для двох типів мереж, що об'єднують вузли кластера (Fast та Gigabit Ethernet);
2. Розроблено гібридний метод розпаралелювання обчислень, що об'єднує MPI та OpenMP технології розподіленого та багатопоточного програмування;
3. Виконано адаптацію цього метода до моделювання течії в порожнині у формі прямокутного паралелепіпеда;
4. Отримані результати продемонстрували переваги розробленого методу побудови паралельних алгоритмів перед кожною з технологій, що є його складовою з точки зору ефективності розпаралелювання;
5. Реалізація цього методу при алгоритмізації та програмуванні не потребує зна-

чного ускладнення та використання суттєвих додаткових ресурсів, забезпечуючи в результаті кращу адаптацію до сучасних архітектур кластерних обчислювальних систем та зменшення витрат на чисельні експерименти;

6. Подальше удосконалення цього метода полягатиме у його застосуванні до моделювання турбулентних течій, зокрема, на основі методу моделювання динаміки великих вихорів.

Література

1. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа / Л.Г. Лойцянский – М.: “Наука”, 1987. – 840 с.
2. Ламб Г. Гидродинамика/ Г. Ламб – М.: Гостехиздат, 1947. – 928 с.
3. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя/ Г. Шлихтинг – М.: Изд. иностр. лит., 1959. – 528 с.
4. Kawamura H, Abe H. DNS of Turbulent Heat Transfer in Channel Flow With Respect to Reynolds-Number Effect/ H. Kawamura, H. Abe // Proc. of the 2nd Engineering Foundation Conference in Turbulent Heat Transfer. – Manchester, UK, 1998. – V. 1 – P. 1–15 – 1–22.
5. Антонов А.С. Параллельное программирование с использованием технологии OpenMP: Учебное пособие/ А.С. Антонов – М.: МГУ, 2009. – 77 с.
6. Matloff's N. MPICH/MPICH2 MPI Tutorial/ N. Matloff's Електронний ресурс. Режим доступу: <http://heather.cs.ucdavis.edu/~matloff/MPI/NotesMPICH.NM.html>.

Bibliography (transliterated)

1. Lojczanskij L.G. Mehanika zhidkosti i gaza L.G. Lojczanskij – М.: “Nauka”, 1987. – 840 p.
2. Lamb G. Hidrodinamika G. Lamb – М.: Gostehizdat, 1947. – 928 p.
3. Shlihting G. Teorija pogranychogo sloja G. Shlihting – М.: Izd. inostr. lit., 1959. – 528 p.
4. Kawamura H, Abe H. DNS of Turbulent Heat Transfer in Channel Flow With Respect to Reynolds-Number Effect H. Kawamura, H. Abe Proc. of the 2nd Engineering Foundation Conference in Turbulent Heat Transfer. – Manchester, UK, 1998. – V. 1 – P. 1–15 – 1–22.
5. Antonov A.S. Parallel'noe programmirovaniye s ispol'zovaniem tehnologii OpenMP: Uchebnoye posobie A.S. Antonov – М.: MGU, 2009. – 77 p.
6. Matloff's N. MPICH/MPICH2 MPI Tutorial N. Matloff's Elektronnij resurs. Rezhim dostupu: <http://heather.cs.ucdavis.edu/~matloff/MPI/NotesMPICH.NM.html>.

УДК 681.322

Шквар Е.А.

**ИНТЕГРИРОВАННАЯ ГИБРИДНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ
ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ**

Выполнен анализ эффективности применения интегрированной гибридной параллельной технологии ресурсоемких вычислений, являющейся адаптированной к применению на кластерных вычислительных системах с многопроцессорными или многоядерными узлами, которые одновременно обеспечивают симметричный и распределенный виды мультипроцессорной обработки. Приведены примеры применения предложенного подхода, проанализированы причины замедления масштабирования производительности вычислений по мере наращивания вычислительной мощности распределенной системы. Определены приоритетные направления применения разработанного вычислительного метода.

Shkvar Ye.O.

INTEGRATED HYBRID TECHNOLOGY OF PARALLEL COMPUTATIONS

The efficiency of integrated hybrid parallel technology of resource-intensive computations is analyzed. It is oriented on the use of cluster computer systems with multiprocessor or multicore nodes, which are able to realize simultaneous symmetric and distributed types of multiprocessing. The examples of the proposed approach are presented; the reasons of computational productivity scaling delay as a result of growing the processing power of distributed system are analyzed. The priority guidelines of the developed computational method are worked out.