



Рис. 4. Загальний вид каркасно-панельного будинку



Рис. 5. Схематичний план каркасно-панельного будинку: **Експлікація приміщень:**

- 1 – хол з міні-кухнею 32,3 м²;
2 – котельня 4,3 м²; 3 – кабінет 8,9 м²;
4 – кабінет 6,6 м²; 5 – коридор 4,3 м²;
6 – ванна кімната 4,3 м².
Загальна площа будинку: 60,7 м²

- швидкозведені каркасно-панельні будівлі зручні у транспортуванні і не вимагають особливих умов завантаження і розвантаження. Крім того, вони володіють високою міцністю, стійкістю і високими акустичними і теплоізоляційними характеристиками;
- порівняно мала питома вага каркасного будинку дозволяє зводити його на полегшений фундамент (гвинтові палі, буронабивні палі, малозаглиблені стрічкові фундаменти). Термін монтажу одноповерхового будинку каркасно-панельної конструкції площею 30 – 70 м² становить зазвичай 3 – 5 днів;
- промислове виробництво каркасно-панельних будинків із використанням спеціалізованих матеріалів гарантує високу якість кожної деталі, що підвищує якість складання будівель і надійність з'єднань.

ВИКОРИСТАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Адам Ф. М. Особенности монтажа быстровозводимых зданий. Монтажные и специальные работы в строительстве / Ф. М. Адам. – М., 2001. – С. 12 – 16.
2. Теория и практика использования быстровозводимых зданий / А. Н. Асаул, Ю. Н. Казаков, В. Л. Быков, И. П. Князь, П. Ю. Ерофеев. – СПб, Гуманистика, 2004. – 463 с.
3. Булгаков Н. Архитектурное проектирование энергосберегающих, комфортных жилых домов. Информац. материалы / Н. Булгаков. – М., 2000. – 42 с.
4. Дорошенко Д. Каркасный дом по канадской технологии. – СПб. : Питер, 2011. – 208 с.
5. Левадный В. С., Самойлов В. С. Строительство каркасного дома. – М. : Аделант, 2009. – 352 с.

УДК 622.4:532.595.2

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В СКРВ ЧИСЛЕННО-АНАЛИТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Ф. А. Корсун, к. т. н.

Ключевые слова: подземная система распределения хладоносителя (ПСРХ); система кондиционирования рудничного воздуха (СКРВ); теплообменник высокого давления (ТВД); гидрораспределитель (ГР); гидравлический удар (ГУ); переходные процессы

Проблема. Для обеспечения микроклимата в глубоких шахтах Донбасса применяются системы кондиционирования рудничного воздуха (СКРВ) с теплообменником высокого давления. Но при передаче холода на глубокие горизонты рекуперативным путем возникают большие потери холода. Предлагается замена ТВД (теплообменника высокого давления) на

гидрораспределитель (ГР), но при переключении потоков жидкости возникают гидравлические удары (ГУ). Чтобы изучить ГУ численно-аналитическим методом, нужно составить математическую модель для проведения исследований при переключении потоков жидкости в ГР.

Анализ публикаций. Проблемой гидравлических ударов в горизонтальных трубопроводах занимались ученые Л. Бержерон, И. Чарный, Г. Розенберг, Н. Жуковский и другие. Они писали, что гидравлический удар в трубопроводе зависит от: диаметра, длины, толщины стенки, скорости, давления и материала трубопровода.

Цель. В этой статье предоставляется математическая модель для изучения ГУ в горизонтальном и вертикальном трубопроводе численно-аналитическим методом, где вместо ГР будет выполнять его действие клапан.

Основной материал. Глубокие шахты Донбасса оборудованы ТВД ПСРХ системы кондиционирования рудничного воздуха.

Для производства холода и передачи его на глубокие горизонты затрачивается до 30 – 40 % электроэнергии от потребляемой мощности всей шахты и соответствующие затраты топлива, что приводит к загрязнению окружающей среды.

Максимально допустимая температура воздуха в горных выработках регламентируется и не должна превышать +26°C. Обеспечение требуемых норм связано с необходимостью использования энергоемких систем регулирования теплового режима шахт и рудников.

Гидроудары хорошо изучены в горизонтальных трубопроводах, в то время как в вертикальных трубопроводах ПСРХ гидравлические удары практически не исследовались.

Так как провести исследования в шахте не целесообразно (дорого и неизвестно, какие будут затраты), было принято решение произвести исследования численно-аналитическим методом на ЭВМ.

Постановка задачи. На рисунке 1 представлена расчетная схема исследуемой системы. Насос 1 прокачивает хладонотеплоноситель через контур, состоящий из напорного 2 и обратного 3 трубопроводов. В момент срабатывания гидрораспределителя и сечение 0 перекрывается, и в системе возникает гидравлический удар. Одновременно (или под действием ударной волны) срабатывает устройство 5, открывающее обводную линию 6, что позволяет проходить ударной волне в обход насоса и защищает его от разрушения.

Необходимо исследовать характеристики переходного процесса, то есть получить зависимость давления и скорости от времени в любом сечении напорного и обратного трубопроводов, в первую очередь в наиболее напряженном сечении 0–0.

Уравнения, описывающие переходный процесс в исследуемом контуре, имеют вид [1]:

$$\begin{cases} -\frac{\partial p}{\partial x} = \rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + 2aw \right) \\ -\frac{\partial p}{\partial t} = \rho c^2 \frac{\partial w}{\partial x} \end{cases}, \quad (1)$$

где $P = \gamma Z + P_c$ – приведенное давление;

γ – объемный вес жидкости;

Z – глубина данного сечения;

P_c – статическое давление;

W – скорость жидкости;

X – координаты вдоль трубопровода;

t – время;

c – 1295 м/с – скорость волны возмущения;

$2a = \left(\frac{\lambda |w|}{8\delta} \right) cp$ – постоянный коэффициент

λ – безразмерный коэффициент гидравлического трения;

$b = f/\chi$ – гидравлический радиус;

f – площадь сечения трубопровода;

χ – смоченный периметр;

g – ускорение силы тяжести.

Эти уравнения необходимо решить при начальных условиях:

$$W = W_0 = const \text{ на всем протяжении трубопровода при } t \leq 0 \quad (2)$$

$P = P_0 + \rho g Z$, и граничных условиях:

$$\left\{ \begin{array}{l} P(t) = P_0 = \text{const на открытых концах напорного и обратного трубопровода} \\ W(t) = W_0 - \int_0^t \frac{\partial w}{\partial t} dt \text{ при } 0 < t < t_1 \text{ – в сечении } 0-0 \\ W(t) = 0 \text{ при } t \geq t_1 \end{array} \right. \quad (3)$$

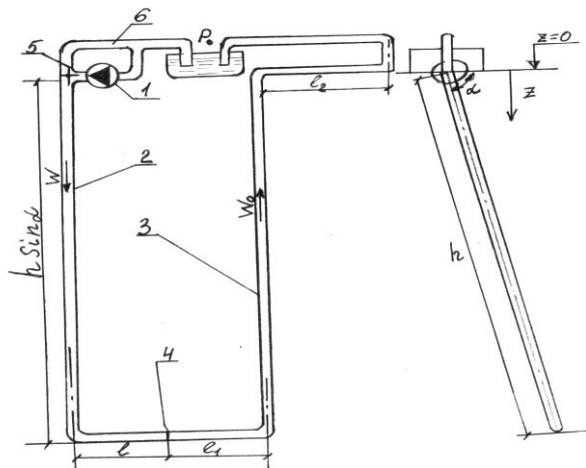


Рис. 1. Гидравлическая схема ПСПХ СКРВ шахт, которая рассчитывается:
1 – насос; 2, 3 – напорный и обратный трубопроводы; 4 – задвижка (гидрораспределитель);
5 – обратный клапан; 6 – обводная линия

Выбор метода расчёта. Телеграфные уравнения (1) являются хорошо изученными линейными уравнениями математической физики. Разработаны несколько методов их решения: метод разделения переменных (метод Фурье) [2] и его модификации; операционный метод [3]; метод контурных интегралов [4]; метод Римана [5]; графический метод, подробно обновленный Л. Бержероном [6]; приближенное интегрирование уравнений гиперболического типа методом характеристик [7].

Наиболее популярным в гидравлике является классический метод Фурье, но наиболее простым и удобным для программирования – представляется метод характеристик. Поэтому прежде чем приступить к расчетам, сравним эти два метода, для чего следует привязаться к определённой системе координат. В гидравлике рекомендуется располагать сечение $x = 0$ у конца трубопровода, где поддерживается известное давление $P(t)$, а сечение $x = l$ у агрегата, изменяющего скорость потока. В методе же характеристик целесообразно совместить начало координат с точкой возмущения. Это позволяет легко определить ход прямых и обратных характеристик и избежать некоторых трудно объяснимых погрешностей. Из этих соображений начало отсчета $x = 0$ совмещено с сечением 0-0.

Оба трубопровода развёрнуты в линию, и ось x направлена вдоль этой линии (рис. 2).

Алгоритм метода Фурье. Из уравнений (1), (2), (3) исключается давление P , при этом получается уравнение второго порядка относительно скорости W :

$$\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + 2a \frac{\partial w}{\partial t} = c^2 \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}, \quad (4)$$

которое необходимо проинтегрировать при начальных условиях

$$\text{при } t \leq 0 \left\{ \begin{array}{l} W = W_0 = \text{const при } 0 < x < l \\ \frac{\partial w}{\partial t} = -2aw_0 \text{ при } 0 < x < l_1 \\ \frac{\partial w}{\partial t} = -2aw_0 + g \text{ при } l_1 < x < l \end{array} \right. \quad (5)$$

и граничных условиях

$$\text{при } t > 0 \left\{ \begin{array}{l} \text{при } x = 0 \left\{ \begin{array}{l} W = W_0 - \int_0^{t_1} \frac{\partial w}{\partial t} dt \text{ при } 0 < t < t_1 \\ W = 0 \text{ при } t \geq t_1 \end{array} \right. \\ \frac{\partial w}{\partial x} = -\frac{1}{\rho c^2} \frac{\partial p}{\partial t} = 0 \text{ при } x = l. \end{array} \right. \quad (6)$$

Ищутся частные решения уравнения (4), удовлетворяющее уравнениям (6), в виде произведения двух функций, из которых одна зависит только от x , а другая – только от T :

$$W = X_{(x)} \cdot T_{(t)} \quad (7)$$

Найденные таким путём частные решения умножаются на некоторые коэффициенты и суммируются так, чтобы удовлетворить начальные условия (5). Построенное выражение будет решением задачи в том случае, когда граничные условия однородны, то есть имеют вид:

$$\begin{cases} \frac{\partial w}{\partial x} = 0 \text{ при } x = l, \\ W = 0 \text{ при } x = 0, \end{cases} \quad (8)$$

чему не удовлетворяет первое уравнение (6). Поэтому предварительно необходимо провести замену переменных так, чтобы граничные условия привести к однородному виду. Если процедуру удалось выполнить, то после соответствующих преобразований получаем решение относительно $W(x, t)$ в виде тригонометрического ряда. Используя найденное решение, дифференцируем W по t , подставляем в первое из уравнений (1) и отыскиваем

$$P(x, t) = P_{x=0} - \rho \int_0^x \left(\frac{\partial w}{\partial t} + 2aw \right) dx. \quad (9)$$

Алгоритм метода характеристик. Идея метода численного решения системы уравнений (1) обоснована в ряде работ, в частности, в [1], и заключается в следующем.

В плоскости xot проводятся прямые и обратные характеристики. Вдоль каждой прямой характеристики справедливо дифференциальное соотношение

$$dp + \rho c dw + \rho \frac{\lambda|w|}{8\delta} w dx = 0, \quad (10)$$

а вдоль обратной – соотношение

$$dp - \rho c dw + \rho \frac{\lambda|w|}{8\delta} w dx = 0. \quad (11)$$

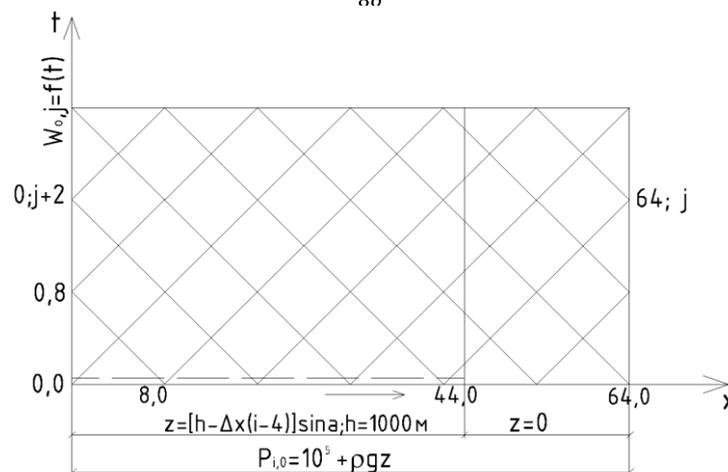


Рис. 2. Сетка для расчета неустановившегося потока методом характеристик

Рассмотрим в плоскости xot две близкие точки 1 и 2 с известными координатами (x_1, t_1) и (x_2, t_2) , рисунок 3. Пусть значения искомых функций p и w в этих точках известны и равны P_1, W_1 и P_2, W_2 (предполагается, что функции p и w удовлетворяют системе уравнений (1))

Проведем через точку 1 прямую характеристику, а через точку 2 – обратную, они пересекутся в точке 3 (в зависимости от взаимного расположения точек 1, 2 и 3 может оказаться необходимым провести через точку 1 обратную характеристику, а через точку 2 – прямую). Если уравнения прямых и обратных характеристик известны, то координаты (x_3, t_3) точки 3 могут быть найдены как графически, так и аналитически.

Заменяя теперь в уравнениях (10) и в (11) дифференциалы конечными разностями, получим систему двух уравнений для определения приближенных значений P_3 и W_3 в точке 3:

$$\begin{cases} (p_3 - p_1) + \rho c (w_3 - w_1) + \rho \frac{\lambda|w_1|}{8\delta} w_1 (x_3 - x_1) = 0, \\ (p_3 - p_2) + \rho c (w_3 - w_2) + \rho \frac{\lambda|w_2|}{8\delta} w_2 (x_3 - x_2) = 0. \end{cases} \quad (12)$$

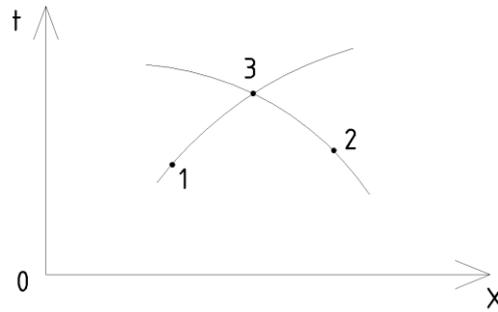


Рис. 3. Алгоритм расчета методом характеристик: 1 – прямая характеристика; 2 – обратная характеристика

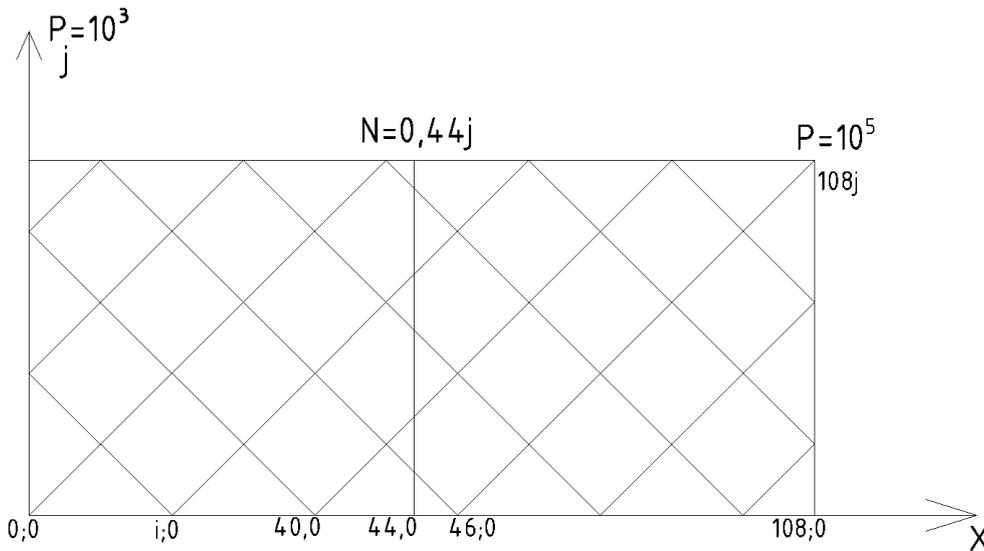


Рис. 4. Сетка для расчета неустановившегося потока у насоса на поверхности шахты методом характеристик

Умея решать такую элементарную задачу отыскания значений P_3W_3 по заданным значениям P_1W_1 и P_2W_2 , можно численно решить систему уравнений (1) при заданных начальных и граничных условиях.

Если скорость звука вдоль трубы постоянна (что имеет место в нашем случае), то уравнения прямых и обратных характеристик – это уравнение прямых линий:

$$x - ct = x_0 - ct_0 \quad (13)$$

$$x + ct = x_0 + ct_0 \quad (14)$$

Так как в эти уравнения не входят значения p и w , то в плоскости $x - t$ можно заранее построить сетку характеристик желаемой густоты (рис. 2)

Далее, зная из начальных условий значения p и w во всех выбранных точках оси x , а из граничных условий – значение одной из функций (p или w) в точках $x = 0$ и $x = 1$, можно вычислить на каждом шаге Δt значения p и w во всех точках вдоль x . То есть метод позволяет рассчитать значения скорости и давления в любой точке трубопровода в любой момент времени.

Простота алгоритма счета заставила нас отдать предпочтение методу характеристик. Следует отметить, что реализация метода стала возможной с развитием быстродействующих ЭВМ и не удивительно, что в предыдущие годы использовались методы, связанные с более сложными преобразованиями, но менее трудоемкими расчетами.

Расчет гидроудара без учета кавитации. На рисунке 2 представлена сетка прямых и обратных характеристик для напорного и обратного трубопроводов. Начало координат выбрано в точке возмущения. Напорный трубопровод показан пунктиром, обратный – сплошной линией. При таком выборе координат начальная скорость в напорном трубопроводе будет отрицательной, в обратном – положительной.

На схеме указано расположение начального давления вдоль трубопровода $P_{i,0}$ и граничные условия: при $x = 0$ задан закон изменения скорости во времени, при $x = l$ задано давление. Оно принято равным атмосферному и для обратного и для напорного трубопровода, т. к. ударная волна идет в обход насоса и отражается от резервуара.

Шаг по времени Δt и шаг по длине Δx связаны соотношением

$$\Delta t = \Delta x / c \quad (15)$$

что следует из уравнения характеристики. Шаг по времени выбирается из следующих соотношений: по результатам моделирования получается, что при закрытии задвижки в трубопроводе возникает 17 гармоник давления, затухающих в течение 43 с, то есть одна гармоника занимает примерно 2,5 с. Допустим, чтобы точно построить эту гармонику, на ней надо вычислить не менее 24 – 25 точек, значит, интервал времени между ними должен быть $\Delta t \leq 0,1$ с, при этом $\Delta x \leq c \cdot \Delta t = 12,95 \cdot 0,1 \sim 1,3$ Ом. При моделировании шаг разбиения трубопровода на элементарные участки принимался равным 50 м. При расчета методом характеристик принято $\Delta x = 25$ м, при этом $\Delta t = 0,0193$ с.

При пробных расчетах были проанализированы варианты с увеличенным и уменьшенным шагом: $\Delta x = 50$ м и $\Delta x = 12,5$ м. Результаты отличались в третьем – четвертом знаке. В дальнейшем во всех расчетах принималось $\Delta x = 25$ м, то есть напорный трубопровод разбивался на 44 элементарных участка, обратный – на 64. При исследовании трубопроводов другой длины l , они тоже разбивались на 44 участка, при этом $\Delta x = l / 44$.

Для удобства анализа результатов расчета следует заметить, что если количество шагов по T для фазы удара T соответствует:

$$j = \frac{T}{\Delta t} = \frac{Tc}{\Delta x} = \frac{2l}{\Delta x} = 2i, \quad (16)$$

после этих замечаний можно перейти к алгоритму расчета.

Внутренние точки области. Считаем, что P и W для всех точек $(j-1)^{ii}$ строки известны, и распишем систему уравнений (12) для точки $(i,j)^{ii}$ строки, обозначив для краткости

$$\rho c = const_1 \quad (17)$$

$$\frac{\rho \lambda}{8\delta} = const_2 \quad (18)$$

$$\begin{cases} P_{i,j} - P_{i-1,j-1} + const_1(w_{i,j} - w_{i-1,j-1}) + const_2|w_{i-1,j-1}|w_{i-1,j-1} \cdot \Delta x = 0, \\ P_{i,j} - P_{i+1,j-1} - const_1(w_{i,j} - w_{i-1,j-1}) - const_2|w_{i+1,j-1}|w_{i+1,j-1} \cdot \Delta x = 0. \end{cases} \quad (19), (20)$$

Перепишем эти уравнения в стандартном виде относительно искомым величин P_i, j, w_i, j :

$$\begin{cases} P_{i,j} + const_1 w_{i,j} = P_{i-1,j-1} + const_1 w_{i-1,j-1} - const_2|w_{i-1,j-1}|w_{i-1,j-1} \cdot \Delta x = const_3(i-1, j-1), \\ P_{i,j} - const_1 w_{i,j} = P_{i+1,j-1} - const_1 w_{i+1,j-1} + const_2|w_{i+1,j-1}|w_{i+1,j-1} \cdot \Delta x = const_3(i+1, j-1). \end{cases} \quad (21), (22)$$

Определители этой системы:

$$D = \begin{vmatrix} 1 & const_1 \\ 1 & -const_1 \end{vmatrix} = -2const_1, \quad (23)$$

$$D_1 \begin{vmatrix} const_3 & const_1 \\ const_4 & -const_1 \end{vmatrix} = -const_1 (const_3 + const_4), \quad (24)$$

$$D_2 \begin{vmatrix} 1 & const_3 \\ 1 & const_4 \end{vmatrix} = const_4 - const_3. \quad (25)$$

Отсюда определяются параметры внутренних точек:

$$P_{i,j} = \frac{D_1}{D} = \frac{const_3 + const_4}{-2}, \quad (26)$$

$$W_{i,j} = \frac{D_2}{D} = \frac{const_3 + const_4}{2const_1}, \quad (27)$$

Для анализа результатов удобно знать в каждой точке не только абсолютное давление, но и отклонение его от стационарного режима.

$$\Delta P_{i,j} = P_{i,j} - P_{i,0} \quad (28)$$

Точки левой границы. Имеется только обратная характеристика, но скорость w_0, j известна. Для обратной характеристики справедливо соотношение

$$P_{0,j} = P_{1,j-1} - const_1(w_{0,j} - w_{1,j-1}) - const_2|w_{1,j-1}|w_{1,j-1} \cdot \Delta x = 0. \quad (29)$$

Откуда

$$P_{0,j} = P_{1,j-1} + const_1(w_{0,j} - w_{1,j-1}) + const_2|w_{1,j-1}|w_{1,j-1} \cdot \Delta x = 0, \quad (30)$$

$$\Delta P_{0,j} = P_{0,j} - P_{0,0}. \quad (31)$$

Точки правой границы. Имеется только прямая характеристика, но давление P_{44} (или P_{64} , j – для обратного трубопровода) известно. Для прямой характеристики имеет место соотношение:

$$(P_{44,j} - P_{43,j-1}) + \text{const}_1(w_{44,j} - w_{43,j-1}) + \text{const}_2|w_{43,j-1}|w_{43,j-1} \cdot \Delta x = 0 \quad (32)$$

откуда

$$w_{44,j} = w_{43,j-1} - \frac{1}{\text{const}_1}(P_{44,j} - P_{43,j-1}) + \text{const}_2|w_{43,j-1}|w_{43,j-1} \cdot \Delta x = 0 \quad (33)$$

Параметры внутренних точек считаются во всех строках, параметры граничных точек – только в четных строках.

Далее составлены программы для расчета прямого мгновенного и прямого растянутого удара в напорном и обратном трубопроводах:

$$\tau_3 = 0 \begin{cases} P_{r02} \text{—напорный трубопровод, } w_{0,j}=0; |w|=\vartheta ar \\ P_{r021} \text{—напорный трубопровод, } w_{0,j}=0; |w|=|w_0|=\text{const} \\ P_{r03} \text{—обратный трубопровод, } w_{0,j}=0; |w|=\vartheta ar \\ P_{r031} \text{—обратный трубопровод, } w_{0,j}=0; |w|=|w_0|=\text{const}. \end{cases} \quad (34)$$

$$\tau_3 = T \begin{cases} P_{r04} \text{—напорный трубопровод, } w_{0,j}=-2\left(1-\frac{j}{88}\right)\dots 0; |w|=\vartheta ar \\ P_{r041} \text{—напорный трубопровод, } w_{0,j}=-2\left(1-\frac{j}{88}\right)\dots 0; |w|=|w_0|=\text{const} \\ P_{r05} \text{—обратный трубопровод, } w_{0,j}=+2\left(1-\frac{j}{88}\right)\dots 0; |w|=\vartheta ar \\ P_{r051} \text{—обратный трубопровод, } w_{0,j}=+2\left(1-\frac{j}{88}\right)\dots 0; |w|=|w_0|=\text{const}. \end{cases} \quad (35)$$

Выводы. Уточнена математическая модель по расчету методом характеристик, которая описывает неустановившееся движение хладоносителя в системе шахтного кондиционирования с постановкой начальных и граничных условий.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Левин В. И. Методы математической физики. – М. : Мир, 1981. – 598 с.
2. Зубов Л. Б. Повышение точности приближенных аналитических решений уравнений неустановившегося напорного движения жидкости в трубах // Сб. науч. тр. Инженерная гидравлика. – М. : Стройиздат, 1972. – С. 67 – 73.
3. Ульянов В. А. Расчеты режимов дальних электропередач переменного тока. – М. : Высш. школа, 1966. – 143 с.
4. Годунов С. К., Золотарев Е. В. Сборник задач по уравнениям математической физики. Ред. С. Л. Соболев. – Новосибирск : Наука, 1974. – 74 с.
5. Бергерон Л. От гидравлического удара в трубах до разряда в электрической сети. – М. : Машгиз. 1962. – 348 с.
6. Годунов С. К. Уравнения математической физики. – М. : Наука. 1971. – 416 с.