

УДК 51-74

Научная статья

Введение вспомогательной функции для расчета и разработки алгоритмов функционирования и управления магистральными газопроводами

Р. И. Хуррамова¹, Б. Э. Юлдашев²

¹ Ташкентский институт текстильной и легкой промышленности, Узбекистан, 100100, г. Ташкент, ул. Шохжахон, 5

² Ташкентский педиатрический медицинский институт, Узбекистан, 100140, г. Ташкент, ул. Богишамол, 223

E-mail: бахром@rambler.ru

Актуальность работы обусловлена необходимостью поиска путей повышения эффективности работы, а также совершенствование математического и программного обеспечения процедур оптимального развития трубопроводных сетей, поэтому в данной статье основное внимание направлено на анализ математических моделей и создание вычислительных алгоритмов для функционирования и управления однониточными магистральными газопроводами (МГ) с постоянным диаметром, учитывающий все режимы задания граничных условий и движения газа в реальных системах магистральных газопроводов. Разработана обобщенная методика оперативного управления режимами работы однониточных МГ с сосредоточенными отборами и подкачками газа, с переменными диаметрами для динамического режима газопотребления при различных заданиях граничных условий на входе и выходе КС. Введена новая функция, которая сглаживает разрывы расхода в элементарных участках и при переходе от одного диаметра (или участка) к другому.

Ключевые слова: математическая модель, магистральный газопровод, вспомогательная функция, алгоритм, трубопроводные системы, газопотребление, динамический режим, транспорт газа, статический режим, газ, численный метод, прогонка.

DOI: 10.26117/2079-6641-2020-31-2-92-116

Поступила в редакцию: 10.04.2020

В окончательном варианте: 10.06.2020

Для цитирования. Хуррамова Р. И., Юлдашев Б. Э. Введение вспомогательной функции для расчета и разработки алгоритмов функционирования и управления магистральными газопроводами // *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки.* 2020. Т. 31. № 2. С. 92-116. DOI: 10.26117/2079-6641-2020-31-2-92-116

Контент публикуется на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru>)

© Хуррамова Р. И., Юлдашев Б. Э., 2020

Финансирование. Исследование выполнялось без финансирования

Введение

Эффективный анализ функционирования и управления технологическими объектами возможен лишь в том случае, если известны их качественные и количественные описания. Поэтому управлению и прогнозированию должно предшествовать всестороннее исследование особенностей режимов работы объектов с учетом влияния на них различных факторов в динамическом режиме. Оперативное управление системами трубопроводного транспорта газа предполагает выбор режимов их эксплуатации на основе применения современных математических методов и информационных технологий, причем расчеты должны производиться одновременно для всех участков магистральных газопроводов (МГ).

Сложность аналитического представления процессов, происходящих в отдельных технологических объектах, в частности в магистральных газопроводах, с учетом различных технологических ограничений, характеризуется отсутствием общих математических описаний режимов работ в реальном масштабе времени. Это делает невозможным аналитическое исследование систем магистральных газопроводов с учетом различных факторов, что приводит к усложнению анализа функционирования, прогнозирования и управления объектом. Вместе с тем система магистральных газопроводов является дорогостоящим сооружением, требующим больших капиталовложений.

Следовательно, единственным эффективным инструментом исследования такого рода сложных технологических объектов, каковой является система магистральных газопроводов с учетом факторов, влияющих на режимы ее работы, являются математическое моделирование и вычислительный эксперимент с привлечением новых информационных технологий. Управление магистральными трубопроводами осуществляется за счет режимов работы компрессорных станций, входных и выходных данных, которые являются граничными и внутренними условиями для газодинамических расчетов параметров магистральных газопроводов. Согласно работам [1,4,6-9,10,11,12,13-15,16,17,25,26], трудность управления такими системами, как магистральные газопроводы, обуславливает необходимость учета многих разнородных факторов, прежде всего это потребление газа на протяжении всей трассы МГ. Это приводит к динамическим процессам, для которых до сегодняшнего дня нет единой методики расчетов параметров МГ. С другой стороны, изменения функций состояния газа в МГ носят также динамический характер ввиду того, что изменяется величина отбора потребителями, отключается различное технологическое оборудование и т.д. Всё это приводит к тому, что МГ постоянно находится в динамическом состоянии.

Поэтому для регулирования неравномерного потребления газа на всей протяженности трассы и анализа функционирования МГ необходимо разработать такие математические модели и вычислительные алгоритмы, которые удовлетворяли бы требованиям точности систем управления и были бы очень простыми, а также экономичными.

Постановки задач и методы исследования

Конечная цель нашего исследования – составить вычислительные алгоритмы и программные средства, позволяющие получить полную информацию о состоянии трубопроводной системы штатных и внештатных ситуациях как в стадии проек-

тирования, так и в стадии эксплуатации. В работе [23] приведены постановка и вычислительный алгоритм расчета этой задачи, позволяющие рассчитывать статические и динамические (при большом масштабе времени) состояния трубопровода. При составлении математической и численной моделей МГ учтены факторы телескопичности трубопровода, а также путевые отборы и подкачки газа. В отличие от ранних работ здесь предложен новый способ, заключающийся в введении вспомогательной функции, которая позволяет дискретное изменение расхода распределить на всю остальную часть трубопровода и вести расчет для непрерывных искомым и коэффициентов. Усовершенствование и дополнение данных алгоритма и программного средства требуются в направлениях учета многониточности МГ, рельефа местности, температурного фактора и особенностей компрессорных станций. В рамках данной статьи остановимся на введении новой вспомогательной функции, позволяющей заменить искомым расход на непрерывную функцию (рис. 1).

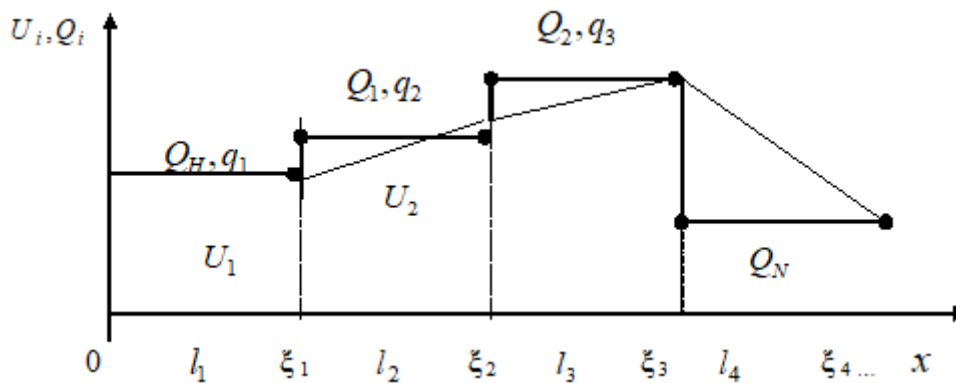


Рис. 1. Изменение расхода Q (толстая линия) и вспомогательной функции $U(x)$ по длине ЭУ МГ

Реальную среду внутри МГ рассматривают как динамическую систему, для которой применимы законы сохранения количества движения и энергии. Согласно этим законам движение газа в однониточном МГ при динамическом режиме газопотребления математически можно привести к следующей системе нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных [28,30,31,32,33]:

$$\begin{cases} \frac{\partial P}{\partial x} + A \frac{Q^2}{P} = C \frac{\partial Q}{\partial t}; \\ B \frac{\partial Q}{\partial x} = -\frac{\partial P}{\partial t}, 0 < x < L, t > 0, \end{cases} \quad (1)$$

где P и Q — давление и расход газа в точке x в момент времени t ;

$$A = \frac{16\lambda\gamma_0^2 ZRT}{\pi^2 D^5}; \quad B = \frac{4ZRT\gamma_0}{\pi D^2}; \quad C = \frac{4\gamma_0}{\pi D^2} \delta, \quad (2)$$

γ_0 — удельный вес газа, отнесенный к нормальному условию;

$$\delta = \begin{cases} 0, & \text{для длинных газопроводов,} \\ 1, & \text{для коротких газопроводов.} \end{cases}$$

Коэффициент гидравлического сопротивления выберем согласно [34]

$$\lambda = 0.067 \left(\frac{158}{Re} + 2 \frac{K_{ш}}{D} \right)^{0.25},$$

где Re — число Рейнольдса; $K_{ш}$ — коэффициент шероховатости трубы.

Для решения системы уравнений (1) необходимо задание начальных и граничных условий.

Начальные условия при $t = 0$:

$$P(x, 0) = f_1(x), 0 \leq x \leq L, Q(x, 0) = f_2(x), 0 \leq x \leq L,$$

Граничными условиями могут быть при $x = 0$:

$$P(0, t) = F_1(t), t > 0 \quad \text{или} \quad Q(0, t) = F_2(t), t > 0,$$

а при $x = L$:

$$P(L, t) = \phi_1(t), t > 0 \quad \text{или} \quad Q(L, t) = \phi_2(t), t > 0,$$

где L — длина газопровода.

Для построения численного алгоритма решения задач необходимо перейти к безразмерным переменным. При этом систему уравнений (1) с начальными и граничными условиями перепишем в следующем виде:

$$\begin{cases} \frac{\partial P^*}{\partial x} + A^* \frac{Q^{*2}}{P^*} = -C^* \frac{\partial Q^*}{\partial t^*}, 0 < x^* < 1; \\ B^* \frac{\partial Q^*}{\partial x} = -\frac{\partial P^*}{\partial t^*}, t^* > 0, \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} P^*(x^*, 0) = f_1(x^*), & 0 \leq x^* \leq 1; \\ Q^*(x^*, 0) = f_2(x^*), & 0 \leq x^* \leq 1. \end{cases} \quad (4)$$

$$P^*(0, t^*) = F_1(t^*), t^* > 0.$$

$$Q^*(0, t^*) = F_2(t^*), t^* > 0; \quad (5)$$

$$P^*(1, t^*) = \phi_1(t^*), t^* > 0; Q^*(1, t^*) = \phi_2(t^*), t^* > 0, \quad (6)$$

где $P^* = P/P_x$; $Q^* = Q/Q_x$; $x^* = x/L$; $t^* = t/\tau$; P_x, Q_x — максимально возможные значения давления и расхода газа по МГ; τ — расчетный промежуток времени; $A^* = A \frac{Q^2 L}{P_x^2}$,

$$B^* = B \frac{Q_x \tau}{P_x L}, C^* = C \frac{Q_x L}{P_x \tau}.$$

В дальнейшем для простоты изложения опустим звездочки и линеаризуем систему уравнений (3), в отличие от работ [29], следующим образом

$$\begin{cases} \frac{\partial P^2}{\partial x} + \tilde{A}Q = -\tilde{C} \frac{\partial Q}{\partial t}, \\ \tilde{B} \frac{\partial Q}{\partial x} = -\frac{\partial P^2}{\partial t}, 0 \leq x \leq 1, t > 0, \end{cases}$$

с соответствующими начальными (4) и граничными условиями (5)-(6), где $\tilde{A} = 2A\tilde{Q}$; $\tilde{B} = 2B\tilde{P}$; $\tilde{C} = 2C\tilde{P}$; \tilde{P} и \tilde{Q} — средние или итерационные значения давления и расхода газа в точке x .

Рассмотрим систему уравнений в безразмерном виде

$$\begin{cases} \frac{\partial P^2}{\partial x} + \tilde{A}_j Q_j + \tilde{C}_j \frac{\partial Q_j}{\partial t} = 0; \\ \frac{\partial P^2}{\partial t} + \tilde{B}_j \frac{\partial Q_j}{\partial x} = 0. \end{cases} \quad (7)$$

На участках $(0; \xi_1)$, (ξ_1, ξ_2) , $(\xi_2, \xi_3), \dots$ расход составляет $Q_H(t)$, $Q_1(t) = Q_H(t) + q_1(t)$, $Q_2(t) = Q_1(t) + q_2(t)$, т.е. в узловых точках $i = 1, 2, 3, \dots, k$ производится отбор (с интенсивностью $q_i < 0$) или подкачка (с интенсивностью $q_i > 0$) газа, интенсивность которых зависит от времени t .

Введем новую вспомогательную функцию $U(x, t)$ для каждого участка. В отличие от использованных в предыдущих работах, она оказалась более экономичной при проведении вычислительного эксперимента и дает хорошие результаты сравнительно с другими методиками расчета сложного трубопровода [3,9,15,24,29]:

$$\begin{aligned} U_1(x, t) &= Q_H(x, t), x \in (0, \xi_1], \\ U_2(x, t) &= Q_1(x, t) + \frac{x - \xi_1}{\xi_2 - \xi_1} q_1(t), x \in (\xi_1, \xi_2], \\ U_3(x, t) &= Q_2(x, t) + \frac{x - \xi_2}{\xi_3 - \xi_2} q_2(t), x \in (\xi_2, \xi_3], \\ &\dots \\ U_i(x, t) &= Q_{i-1}(x, t) + \frac{x - \xi_{i-1}}{\xi_i - \xi_{i-1}} q_{i-1}(t), x \in (\xi_{i-1}, \xi_i]. \end{aligned}$$

Так как $Q_{i-1}(x, t) = Q_i(x, t) - q_{i-1}(t)$, то $U_i(x, t) = Q_i(x, t) - q_{i-1} + \frac{x - \xi_{i-1}}{\xi_i - \xi_{i-1}} q_{i-1}$ или $U_i(x, t) = Q_i(x, t) + \frac{x - \xi_i}{l_i} q_{i-1}(t)$, где $l_i = \xi_i - \xi_{i-1}$ — длина i -го участка.

Данная функция, как видно из рисунка, непрерывна, как и функция, использованная в работах [3,9,21,22,27,28], но во внутренних границах элементарного участка (ЭУ) (в точках отбора и подкачки) она принимает равное с расходом в левой части данного узла значение.

Таким образом, вспомогательная функция приобретает физический смысл: в начале i -го участка с длиной l_i осуществлен отбор (подкачка), интенсивность которого (которой) распределена по длине l_i равномерно. Практический выигрыш от этого заключается в том, что появилась возможность контролировать изменения вспомогательной функции: ее значение в точках отбора (подкачки) совпадает со значением расхода в данной точке со стороны входа.

Данную вспомогательную функцию введем в систему безразмерных уравнений для длинного газопровода ($\bar{C}_i = 0$)

Так как $Q_i = U(x, t) - \frac{x - \xi_j}{L_j} q_{j-1}(t)$, то система уравнений принимает вид

$$\begin{cases} \frac{\partial P}{\partial x} + \tilde{A}_j \left(\bar{U} - \frac{x - \xi_j}{L_j} q_{j-1}(t) \right) = 0 \\ \frac{\partial P}{\partial t} + \bar{B}_j \frac{\partial U}{\partial x} - \frac{\bar{B}_j}{L_j} q_{j-1} = 0. \end{cases} \quad (8)$$

Далее переходим к дискретному аналогу данной системы.

Введем дискретные координаты: пространственную $h_j = L_j/m_j = const$ и временную $\Delta t = t_k - t_{k-1}$. Чтобы внутренние границы совпадали с сеточной точкой, m_j принимали четные значения, т.е. $[\xi_j/h_j]$ округляли до четного числа. Таким образом, начало счета по времени составляло $t_0 = 0$, а по пространству $x = 0$ ($j = 1$).

Поскольку в начале и/или/ конце рассматриваемого линейного участка задавались разные условия, то, исходя из этого, и составим конечно-разностные аналоги системы уравнений.

Задача 1. Заданы P_H и Q_H

Дискретные производные давления представляются нечетными координатами, а функции U — четными. Предпринимаемый такой шаг объясняется необходимостью реализации граничных условий как в данной, так и в последующих задачах.

$$\begin{cases} \frac{P_{i+1} - P_{i-1}}{2h_i} + \tilde{A}_j \left(U_i - (x - \xi_j) \frac{q_{j-1}}{l_j} \right) = 0, \\ \frac{P_{i-1} - \bar{P}_{i-1}}{\Delta t} + B_{j-1}^* \frac{U_i - U_{i-2}}{2h_i} - B_{j-1}^* \frac{q_{j-1}}{l_j} = 0, \end{cases} \quad (9)$$

Здесь \bar{P}_{i-1} — значение давления в предыдущем временном слое, а значения h_i , \tilde{A}_j , B_{j-1}^* берутся для соответствующего элементарного j -го участка.

Обозначив $S_j = \frac{q_{j-1}}{l_j}$ и $S_i = (x - \xi_j) \frac{q_{j-1}}{l_j}$, уравнениям придаем вид

$$\begin{cases} \frac{1}{h_j \tilde{A}_j} (P_{i+1} - P_{i-1}) + U_i - S_i = 0, \\ \frac{2h_i}{\Delta t B_{j-1}^*} (P_{i-1} - \bar{P}_{i-1}) + U_i - U_{i-2} - 2h_j S_j = 0, \end{cases}$$

или

$$\begin{cases} U_i = a_i (P_{i-1} - P_{i+1}) + S_i, \\ U_i = U_{i-2} - b_{i-1} P_{i-1} + 2h_i S_j + b_{i-1} \bar{P}_{i-1}, \end{cases} \quad (10)$$

где использовали обозначения $a_i = \frac{1}{2h_i \tilde{A}_j}$, $b_{i-1} = \frac{2h_i}{\Delta t B_{j-1}^*}$.

Организуем прогонку U_i по четным координатам согласно зависимости. В частности, $U_0 = a'_2 U_2 + b'_2 = Q_H$, где

$$U_i = a'_{i+2} U_{i+2} + b'_{i+2}.$$

$$a'_2 = 0, \quad b'_2 = Q_H.$$

Из прогоночной зависимости для предыдущего значения i следует

$$U_{i-2} = a'_i U_i + b'_i.$$

Вставим данное во второе уравнение системы (10).

$$U_i = a'_i U_i + b'_i - b_{i-1} P_{i-1} + 2h_i S_j + b_{i-1} \bar{P}_{i-1}.$$

Преобразуя последнее, получим

$$P_{i-1} + \alpha_i U_i = \beta_i \quad (11)$$

Совместно с (11) и первым уравнением системы (10) составляется система

$$\begin{cases} U_i = \frac{\beta_i}{\alpha_i} - \frac{P_{i-1}}{\alpha_i}, \\ U_i = a_i (P_{i-1} - P_{i+1}) + S_i, \end{cases}$$

из которой следует прогоночная формула для давления

$$P_{i-1} = \alpha_{i+1}P_{i+1} + \beta_{i+1}, \quad (12)$$

где

$$\alpha_{i+1} = \frac{\alpha_i a_i}{1 + \alpha_i a_i}, \beta_{i+1} = d \frac{\beta_i - S_i}{1 + \alpha_i a_i}. \quad (13)$$

Из аппроксимации 1-го и 2-го уравнений (7), с привлечением $P_{i-1} + \alpha_i U_i = \beta_i$, находим, что $U_i = a'_{i+2} U_{i+2} + b'_{i+2}$, где

$$a'_{i+2} = \frac{a_i}{a_i + b_{i+1}(1 + \alpha_i \alpha_i)}, b'_{i+2} = \frac{b_{i+1}(a_i \beta_i + S_i) - a_i(2h_i S_j^{(i+1)} + b_{i+1} \bar{P}_{i+1})}{a_i + b_{i+1}(1 + \alpha_i \alpha_i)}. \quad (14)$$

Введя соответствующие видоизменения с учетом значений a'_{i+2} и b'_{i+2} , для нахождения значения давления имеем

$$P_{i+1} = -\alpha_{i+2} U_{i+2} + \beta_{i+2},$$

где

$$\alpha_{i+2} = \frac{1 - a_i \alpha_i}{a_i + b_{i+1}(1 + \alpha_i \alpha_i)}, \quad (15)$$

$$\beta_{i+2} = \frac{a_i \beta_i + (1 + \alpha_i \alpha_i)(b_{i+1} \bar{P}_{i+1} + 2h_i S_j^{(i+1)}) + S_i}{a_i + b_{i+1}(1 + \alpha_i \alpha_i)} \quad (16)$$

Вычисление прогоночных коэффициентов для давления осуществляется во внутренних точках по всей длине рассчитываемого линейного участка и начинается с вычисления

$$\alpha_2 = \frac{1}{B_1^*}, \beta_2 = \frac{Q_H}{B_1^*} + \bar{P}_1.$$

Обратная прогонка начинается с вычисления значения

$$P_{N-1} = \beta_N - \alpha_N U_N, \quad (17)$$

с помощью которого определяется и значение P_N . Аппроксимируя уравнения $\frac{\partial P}{\partial x} + \tilde{A}Q = 0$ для $N - 1/2$ - й фиктивной точки $\frac{P_N - P_{N-1}}{h_{N-1}} = \tilde{A}_N Q_N$, получим

$$P_N = P_{N-1} - h \tilde{A}_N Q_N,$$

где Q_N — значение расхода на выходе из рассчитываемого участка, зависящее от времени. После осуществления обратной прогонки получим значения U_i в четных, а P_i — в нечетных точках. Для заполнения массива U в нечетных точках воспользуемся аппроксимацией второго уравнения

$$\frac{P_{i+1} - \bar{P}_{i+1}}{\Delta t} + B_j^* \frac{U_{i+2} - U_{i+1}}{h_i} - B_j^* S_j = 0,$$

а для получения значений P в четных точках — аппроксимацией первого уравнения

$$\frac{P_{i+1} - P_i}{h_i} + \tilde{A}_j Q_{i+1} = 0.$$

В последней стадии прогоночного процесса вычисляются

$$U_1 = Q_1 = Q_H - \frac{h}{B_1^* \Delta t} (P_1 - \bar{P}_1) \text{ и } P_H = P_2 + 2\tilde{A}_1 h_1 Q_1.$$

Таким образом, для фиксированного временного слоя получены следующие приближения значений P_i и Q_i для Задачи 1.

Для Задачи 1 графический результат расчета (рис.2,3).

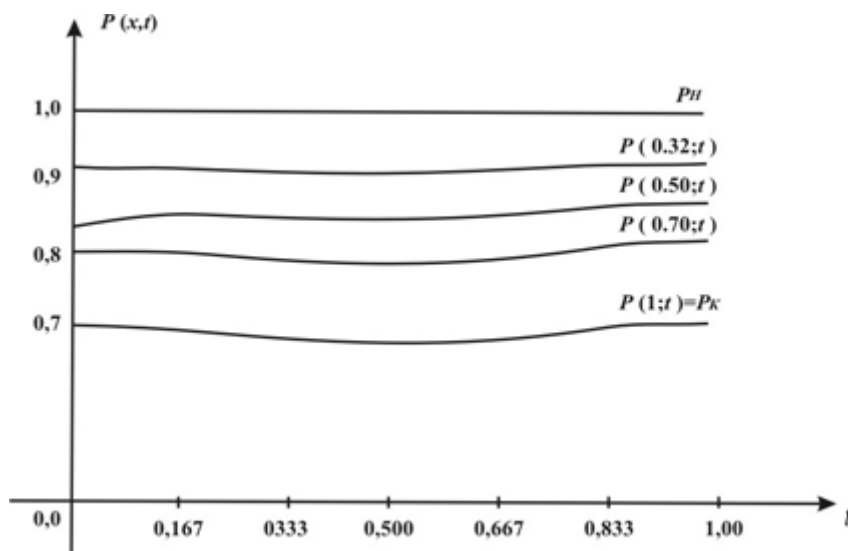


Рис. 2. Изменение давления в течение одних суток в различных точках по длине МГ для Задачи 1

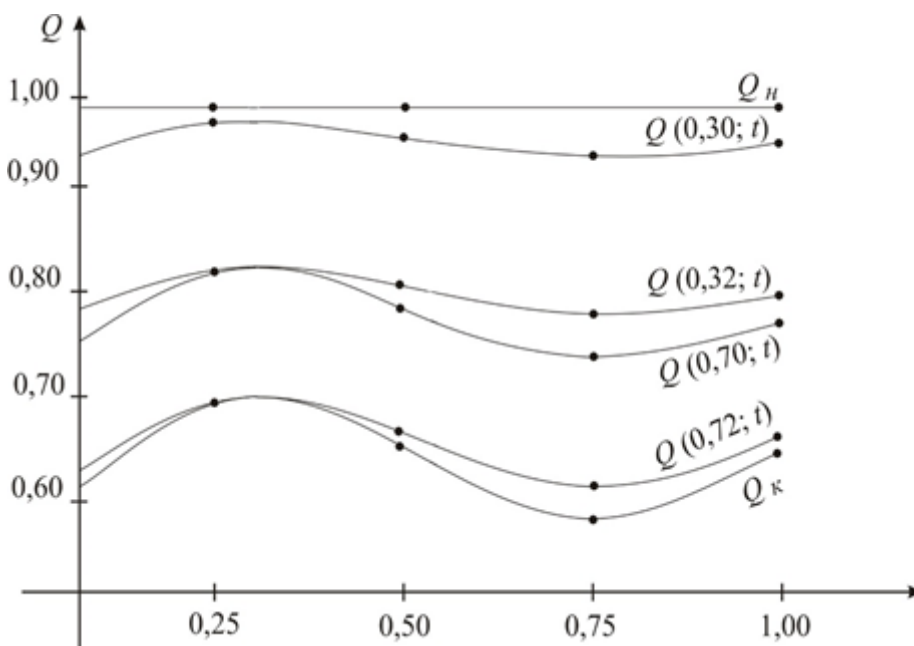


Рис. 3. Изменение расхода газа Q_i за сутки для Задачи 1

Задача 2. Заданы P_H и P_K

Так как значения давления известны в крайних (нечетных) точках, то аппроксимация уравнений и прогоночный процесс строятся для давления в нечетных, а для функции U — в четных точках. В связи с этим дискретный аналог решаемой системы имеет вид

$$\begin{cases} \frac{P_i - P_{i-2}}{2h_{i-1}} + \tilde{A}_j(U_{i-1} - S_{i-1}) = 0, \\ \frac{P_i - \bar{P}_i}{\Delta t} + B_j^* \frac{U_{i+1} - U_{i-1}}{2h_i} + B_i^* S_j^{(i)} = 0, \end{cases}$$

где $S_{i-1} = (x_{i-1} - \xi_j) \frac{q_{j-1}}{l_j}$, $S_j^{(i)} = \frac{q_{j-1}}{l_j}$.

После видоизменений, получим

$$\begin{cases} U_{i-1} = a_{i-1}(P_{i-2} - P_i) + S_{i-1}, \\ U_{i+1} = U_{i-1} - b_i P_i + 2h_i S_j^{(i)} + b_i \bar{P}_i, \end{cases} \quad (18)$$

где $a_{i-1} = \frac{1}{2h_{i-1} \tilde{A}_{j-1}}$, $b_i = \frac{2h_i}{\Delta t B_j^*}$.

Решение ищется в виде $P_i = \alpha_{i+2} P_{i+2} + \beta_{i+2}$, что то же самое

$$P_{i-2} = \alpha_i P_i + \beta_i.$$

Так как из первого уравнения (18) следует

$$U_{i-1} = a_{i-1}(\alpha_i P_i + \beta_i - P_i) + S_{i-1}, U_{i-1} + \alpha_{i-1} P_i = \beta_{i-1}, \quad (19)$$

где

$$\alpha_{i-1} = a_{i-1}(1 - \alpha_i), \quad (20)$$

$$\beta_{i-1} = a_{i-1} \beta_i + S_{i-1}. \quad (21)$$

Совместив второе уравнение (18) с (19), с учетом

$$P_i = -\frac{U_{i-1}}{\alpha_{i-1}} + \frac{\beta_{i-1}}{\alpha_{i-1}},$$

получим

$$U_{i-1} = a'_{i+1} U_{i+1} + b'_{i+1}, \quad (22)$$

где

$$a'_{i+1} = \frac{\alpha_{i-1}}{b_i + \alpha_{i-1}} \quad (23)$$

$$b'_{i+1} = \frac{b_i(\beta_{i-1} - \alpha_{i-1})\bar{P}_i - 2h_i \alpha_{i-1} S_j^{(i)}}{b_i + \alpha_{i-1}}. \quad (24)$$

Решая совместно (18) и (19), получим

$$P_i = \alpha_{i+2} P_{i+2} + \beta_{i+2}, \quad (25)$$

где

$$\alpha_{i+2} = \frac{a_{i+1}}{b_i + a_{i+1} + \alpha_{i-1}}, \beta_{i+2} = \frac{\beta_{i-1} + b_i \bar{P}_i + 2h_i S_j^{(i)} - S_{i+1}}{b_i + a_{i+1} + \alpha_{i-1}}. \quad (26)$$

При известных α_{i+2} и β_{i+2} можно вычислить коэффициенты для

$$U_{i+1} = \beta_{i+1} - \alpha_{i+1} P_{i+2} \quad (27)$$

$$\alpha_{i+1} = \frac{a_{i+1} (b_i + \alpha_{i-1})}{b_i + a_{i+1} + \alpha_{i-1}}, \quad (28)$$

$$\beta_{i+1} = \frac{a_{i+1} (\beta_{i-1} + b_i \bar{P}_i + 2h_i S_j^{(i)}) + (b_i + \alpha_{i-1}) S_{i+1}}{b_i + a_{i+1} + \alpha_{i-1}} \quad (29)$$

Обратная прогонка начинается с вычислений

$$U_{N-1} = \beta_{N-1} - \alpha_{N-1} P_N, Q_{N-1} = U_{N-1} - S_{N-1}.$$

После того, как осуществлена обратная прогонка, аналогично решению Задачи 1, заполняются промежуточные значения P и U .

В частности, используется зависимость

$$U_N = U_{N-1} + \frac{B_N^*}{2} (P_{N-1} - \bar{P}_{N-1}), Q_N = U_N - S_i.$$

Для задачи 2 графический результат расчета (рис.4,5).

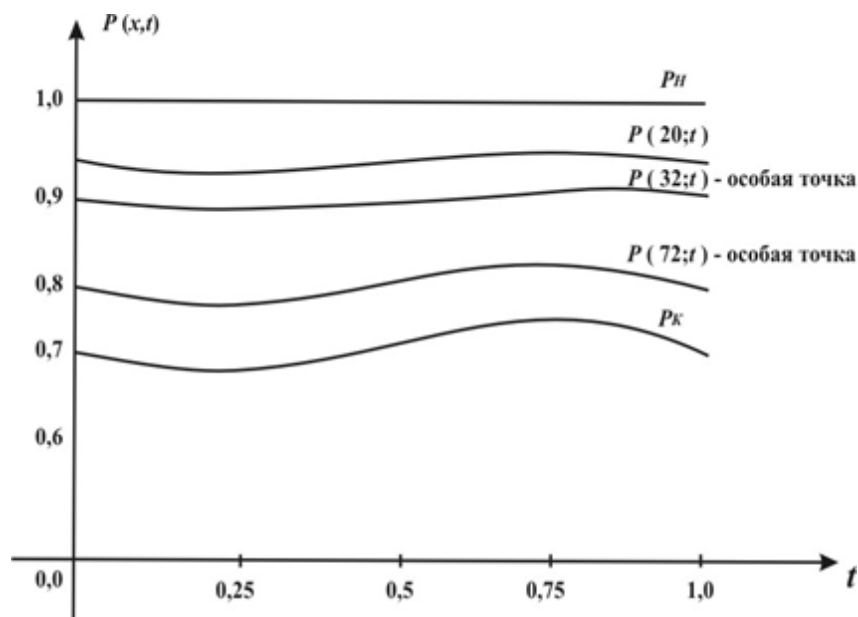


Рис. 4. Изменение давления в течение суток в начале, в сечении $x=20$ км, в особых точках и конце ГП для Задачи 2

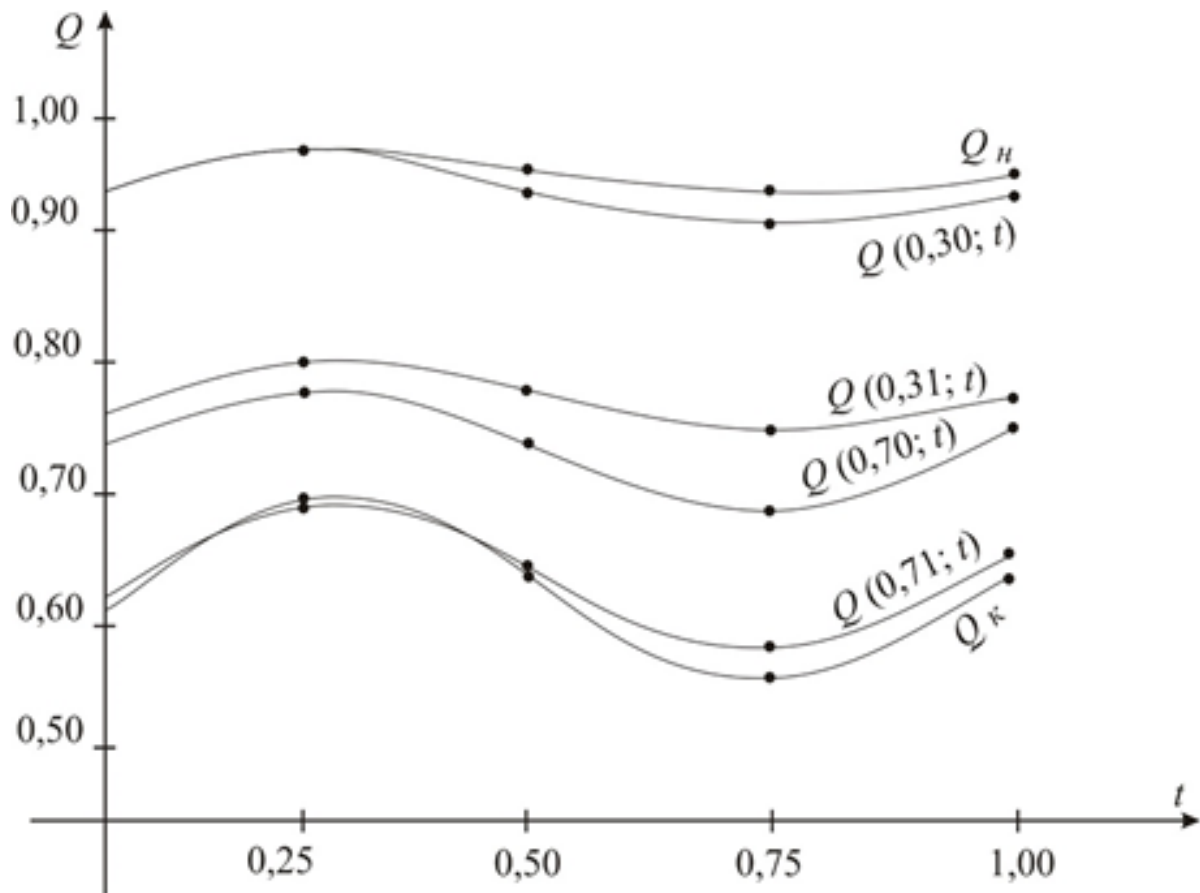


Рис. 5. Изменение расхода газа Q_i по МГ за сутки для Задачи 2

Задача 3. Заданы Q_H и P_K

Прогночный процесс организуется с коэффициентами, которые приведены в части Задачи 1, но начало обратной прогонки несколько отличается. В первое уравнение

$$\frac{P_N - P_{N-1}}{h_{N-1}} = -\tilde{A}_N U_N - \tilde{A}_N S_N$$

вставим значение $P_{N-1} = \beta_N - \alpha_N U_N$ и получим

$$P_N - \beta_N + \alpha_N U_N = -h_{N-1} \tilde{A}_N U_N - h_{N-1} \tilde{A}_N S_N.$$

Отсюда находим

$$U_N = \frac{\beta_N - P_N - h_{N-1} \tilde{A}_N S_N}{\alpha_N + h_{N-1} \tilde{A}_N},$$

с помощью которого определяется

$$Q_k = Q_N = U_N - \alpha_N U_N.$$

Пробелы массивов P и U заполняются по формулам, которые приведены в части Задачи 1.

Для задачи 3 графический результат расчета (рис.6,7).

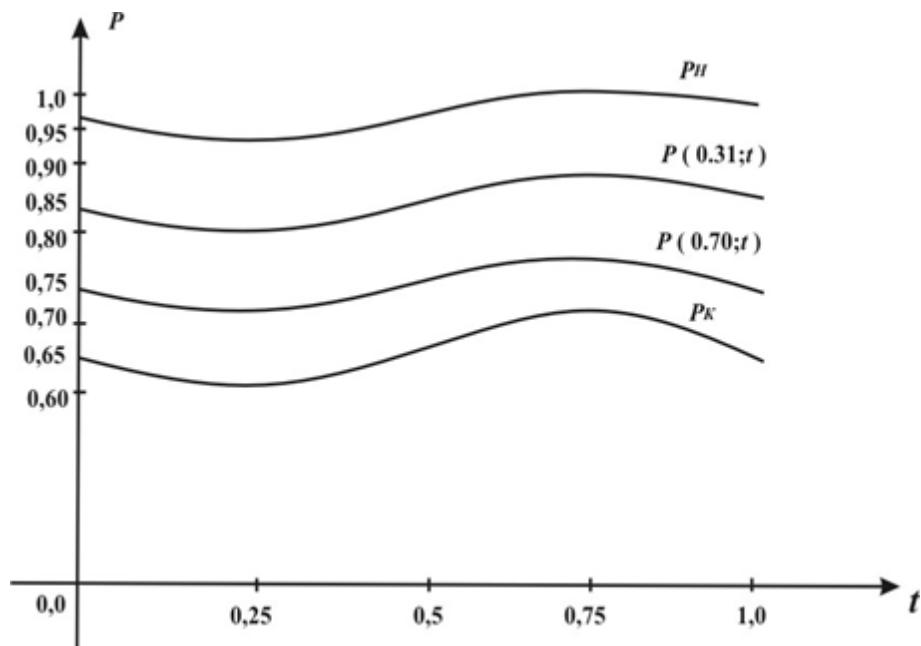


Рис. 6. Изменение давления в течение суток в точках $\bar{x}=0; 0.31; 0.70$ и 1 МГ для Задачи 3

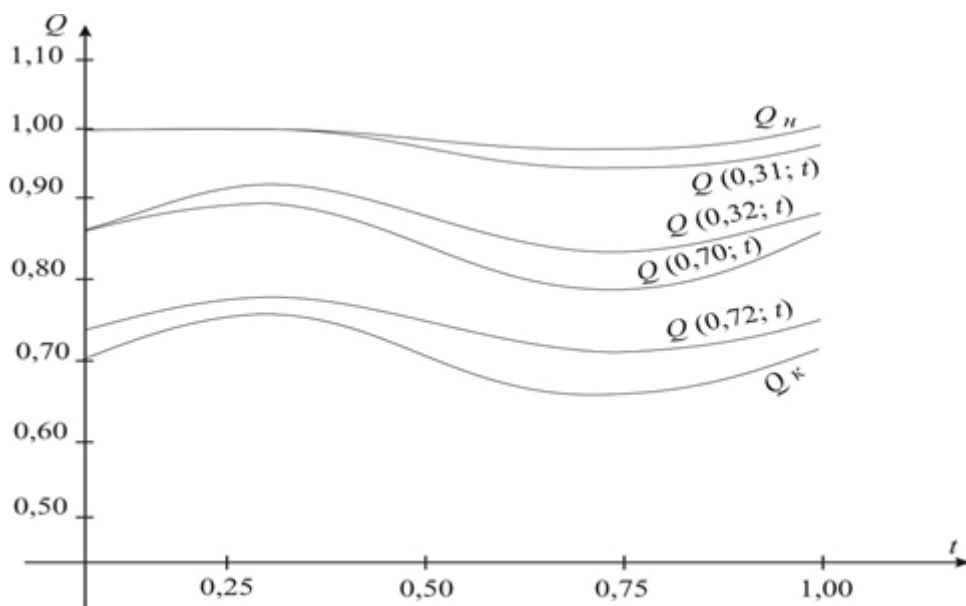


Рис. 7. Изменение расхода газа Q_i по МГ за сутки для Задачи 3

Задача 4. Заданы P_H и Q_K

Прогоночные коэффициенты вычисляются по описанной в части Задачи 2 последовательности. Разница имеется при вычислении значения P_N . Оно определяется из системы

$$\begin{cases} \frac{P_N - \bar{P}_N}{\Delta t} + B_N^* \frac{U_N - U_{N-1}}{h_N} + B_N^* S_j^{(N)} \\ U_{N-1} = \beta_{N-1} - \alpha_{N-1} P_N \end{cases}$$

и составляет

$$P_N = \frac{h_N \bar{P}_N - B_N^* \Delta t (U_{N-1} - h_N S_j^{(N)})}{h + B_N^* \Delta t \alpha_{N-1}}$$

Затем проводится обратная прогонка, как и в части Задачи 2, и заполнение пробелов массивов P и U спомощью вновь вычисленных значений искомым.

Для задачи 4 графический результат расчета (рис.8,9).

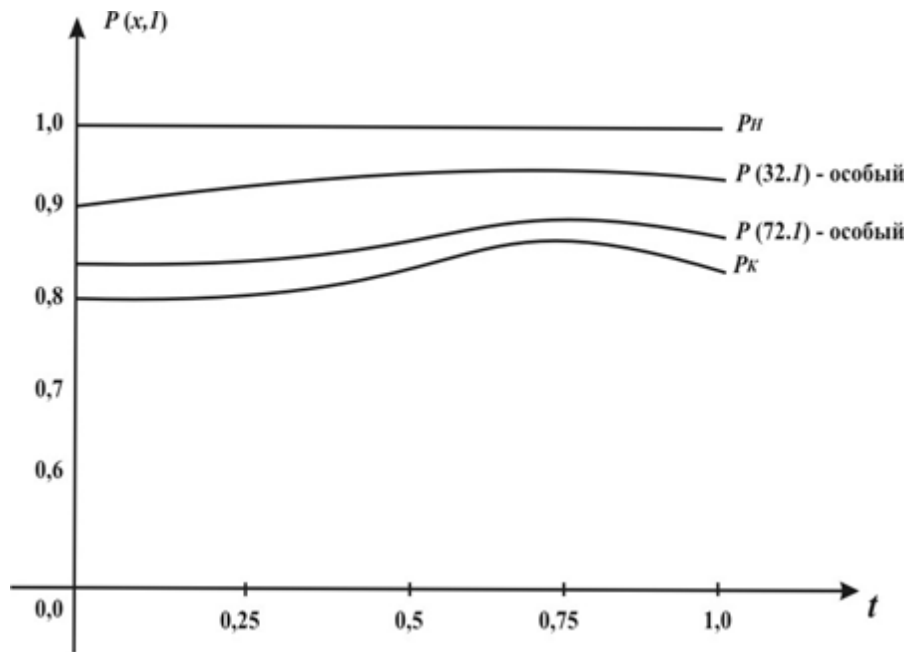


Рис. 8. Изменение давления в течение суток в точках $x=0; 32; 72$ и 100 км МГ для Задачи 4

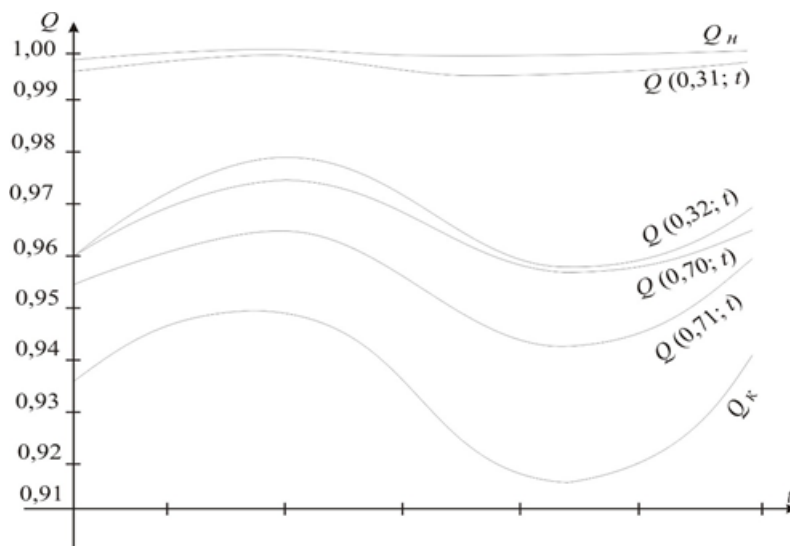


Рис. 9. Изменение расхода газа Q_i по МГ за сутки для Задачи 4

Для реализации алгоритма, описанного выше представим последовательность, которая состоит из двух этапов:

- **На первом этапе** необходимо выполнить расчет газодинамического состояния ГП в газопотреблений статическом режиме, а на втором этапе - при динамическом режиме и с учетом результатов первого этапа.

Приведем основные формулы первого этапа реализации, который служит в дальнейшем как начальное условие при переходе системы из одного состояния в другое:

$$P_H = \begin{cases} P_x, & \eta = 1, \\ \sqrt{P_x^2 + ALQ_H^2}, & \eta = 3 \end{cases} \quad (30)$$

$$P_i = \sqrt{P_H^2 - (P_H^2 - P_K^2) \frac{x}{L}}; \quad (31)$$

$$Q_i = \sqrt{\frac{P_i^2 - P_{i-1}^2}{hA}}; \quad (32)$$

$$P_K = \sqrt{P_H^2 - ALQ_K^2}, \text{ если } \eta = 1, \text{ или } 4, \quad (33)$$

где:

η — признак задания граничных условий, равный номерам Задач 1,2,3,4;

P_i — промежуточные значения давления в i -м узле;

Q_i — промежуточные расходы газа в i -й точке МГ;

P и P_k — давление газа в начальной и в конечной точках МГ, соответственно;

Q_H и Q_K — расход газа в начале и в конце МГ.

При реализации изложенного алгоритма в динамическом режиме газопотребления организуем следующую последовательность вычислительного процесса:

1. Образовать временную и пространственную сетку с шагом h и Δt .
2. Определить значение δ по формуле

$$\delta = \begin{cases} 0, & \text{если } D/L < 0.5 * 10^{-3} \\ 1, & \text{если } D/L \geq 0.5 * 10^{-3} \end{cases}$$

3. Определить удельный вес газа, отнесенный к нормальному условию $\gamma_0 = P_0 / (Z_0 R_0 T_0)$, где Z_0, R_0, T_0 — соответственно коэффициенты сжимаемости, газовая постоянная и температура газа, отнесенные к нормальному условию.

4. Определить коэффициент гидравлического сопротивления по формуле $\lambda = 0.067(158/Re + 2K_{ш}/D)^{0.2}$.

5. Если $\eta = 1, 2$ или 4 принимается $Z=0.91$ — нулевое значение коэффициента сжимаемости.

6. Вычисление P_H по формуле (1)

7. Вычисление P_k по формуле (4)

8. Вычисление среднего значения давления газа

$$P = \frac{2}{3} \left(P_H + \frac{P_K^2}{P_H + P_K} \right)$$

9. Вычисление среднего значения коэффициента сжимаемости

$$Z = \begin{cases} (-0.475 \times 10^{-2} \Delta + 0.626 \times 10^{-3})(P - 6) + 0.982, & T < 298^0 K, \\ (-0.345 \times 10^{-2} \Delta + 0.446 \times 10^{-3})(P_{CP} - 6) + 0.985, & 298^0 K \leq T_{CP} \leq 323^0 K, \\ (-0.125 \times 10^{-2} \Delta + 0.461 \times 10^{-3})(P - 6) + 0.992, & T_{CP} \geq 323^0 K. \end{cases}$$

10. Вычисление значений коэффициентов A, B, C соответственно по формулам (2).
11. Вычисление промежуточного значения давления и расходов газа соответственно по формулам (31) и (32).
12. Печатаение полученных результатов при статическом режиме работы МГ.
13. Переход к вычислению безразмерных переменных по формуле (11).
14. Переход к очередному временному слою, согласование граничных условий.
15. Организация итерационного процесса для \tilde{P}_i, \tilde{Q}_i .
16. Определение коэффициентов уравнения (10).
17. Если $\eta = 1$ или 3, то переход к пункту 28, иначе к 29.
18. Вычисление прогоночных коэффициентов согласно формулам (20), (21), (23), (24), (26).
19. Проверка условия $\eta = 2$ или 4, если нет, то переход к пункту 21, иначе к пункту 20.
20. Вычисление прогоночных коэффициентов по формулам (22), (23), (25), (26), (27) и (28).
21. Проверка условия $\eta = 3$, если нет, то переход к пункту 23, иначе к 22.
22. Вычисление значения расхода газа в конечной точке газопровода по формуле (29).
23. Проверка условия $\eta = 4$, если нет, то переход к пункту 25, иначе к 24.
24. Вычисление значения давления газа в конечной точке МГ.
25. Проверка условия $\eta = 1$ или 3, если нет, то переход к пункту 27, иначе к пункту 26.
26. Вычисление значения Q_i, P_{i-1} ($i = n-2, n-4, \dots, 4, 2$) с помощью формулы (18), (14) и (17).
27. Проверка условия $\eta = 2$ или 4, если нет, то переход к пункту 29, иначе к пункту 28.
28. Вычисление Q_{i-1} по формуле (15) и (16) при $i = n-2, n-4, \dots, 4, 2$.
29. Проверка условия $\eta = 1$ или 3, если нет, то переход к пункту 31, иначе к пункту 30.
30. Вычисление значения давления газа в четных, а расхода газа в нечетных узлах.
31. Проверка условия $\eta = 2$ или 4, если нет, то переход к пункту 33, иначе к пункту 32.
32. Вычисление значений давления и расхода газа для заполнения остальных узлов сетки.
33. Проверка условия сходимости итерационных процессов; если достигнуты условия сходимости, то переход к пункту 34, иначе – организация и уточнение коэффициентов \tilde{A}_i, \tilde{B}_i и \tilde{C}_i и переход к пункту 15.
34. Вычисление функционала по соответствующим формулам (8) -(10).
35. Печать полученных результатов газодинамических параметров МГ при динамическом режиме газопотребления по требуемой форме.

• **Второй этап:**

Вычислительный процесс статической части решения гидравлической задачи проводится по последовательности, которая представлена на рис.10

Вычислительный процесс решения динамической задачи построен по схеме, которая представлена на рис. 11.

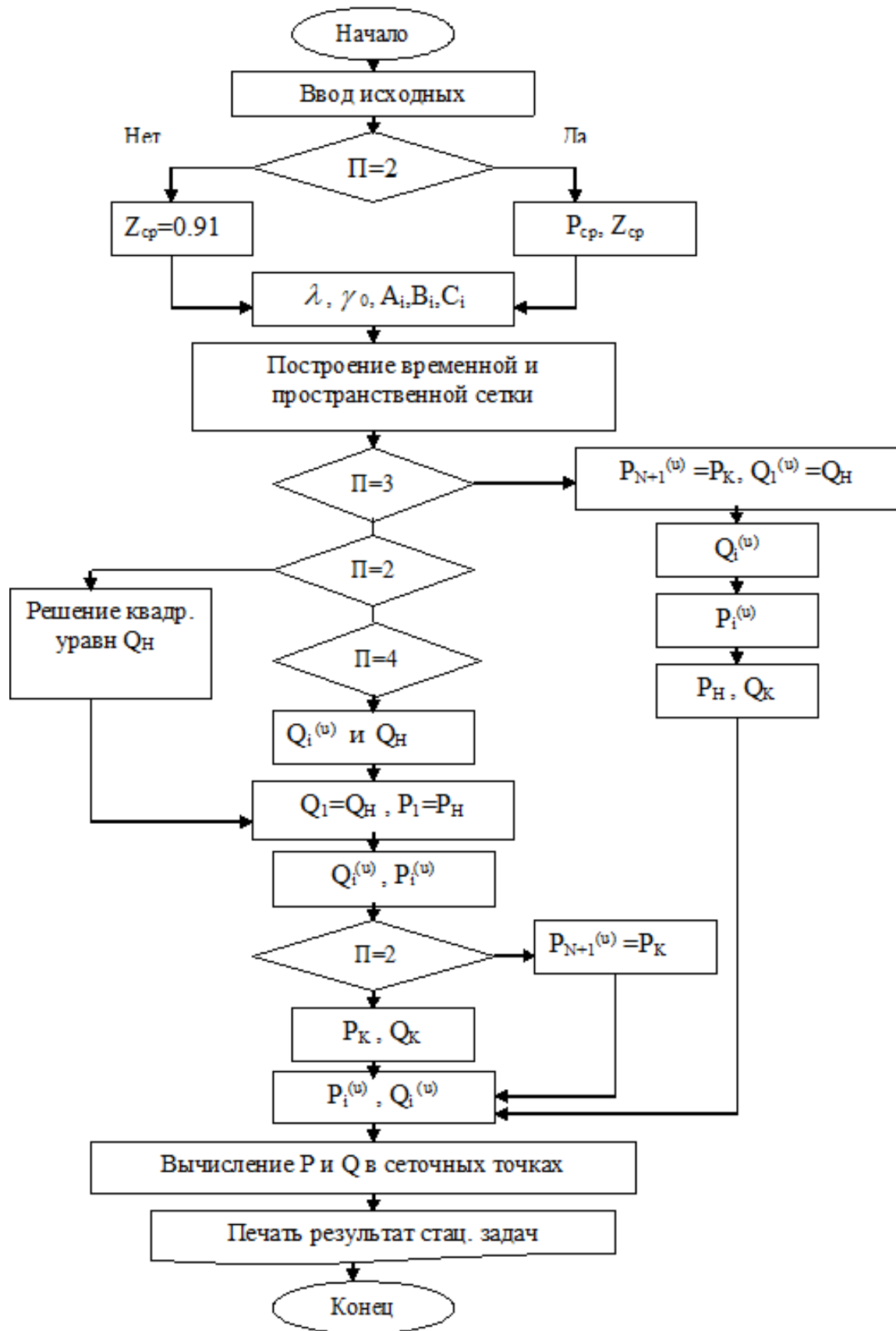
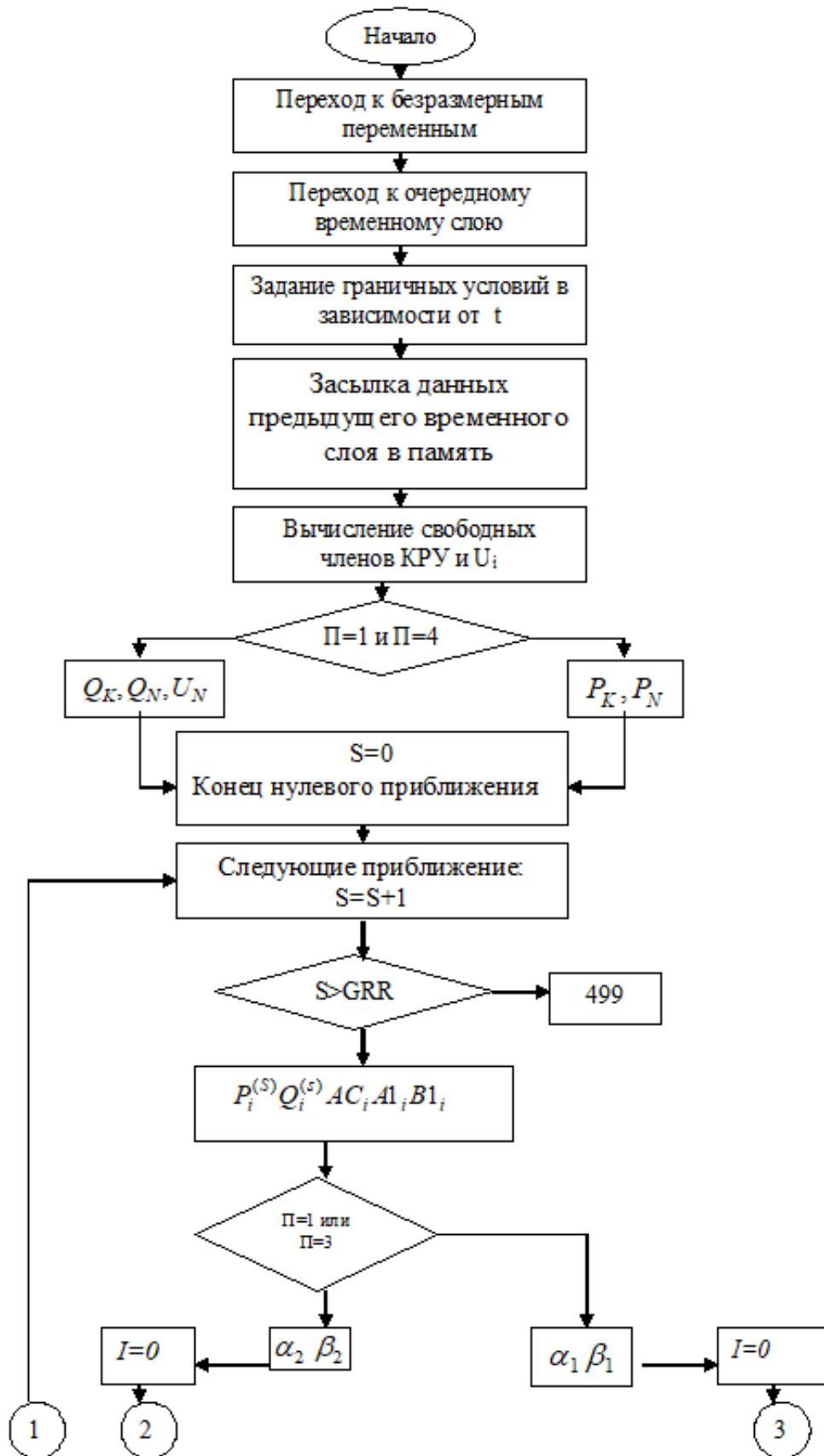
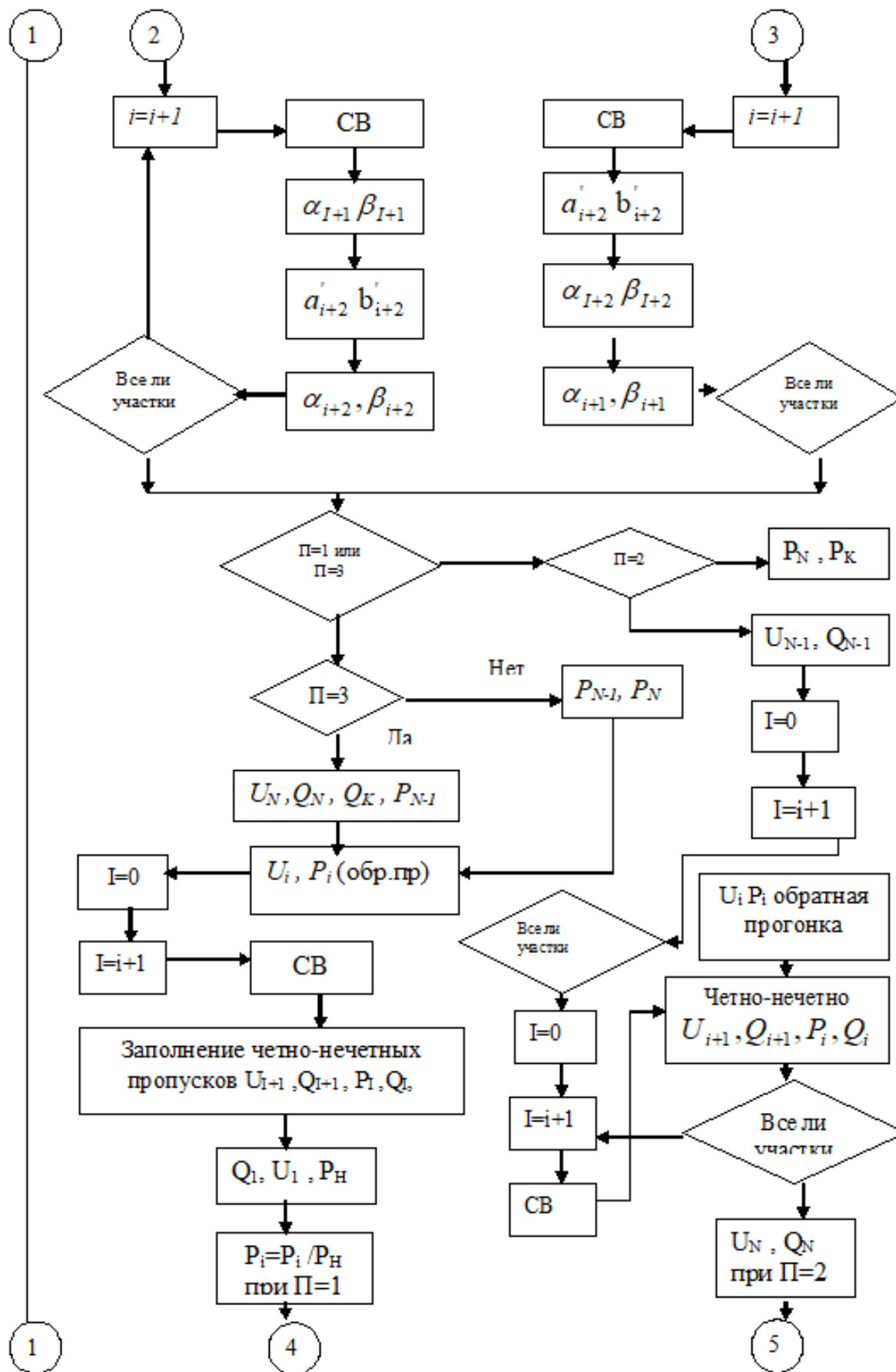


Рис. 10. Последовательность процедур в статическом модуле





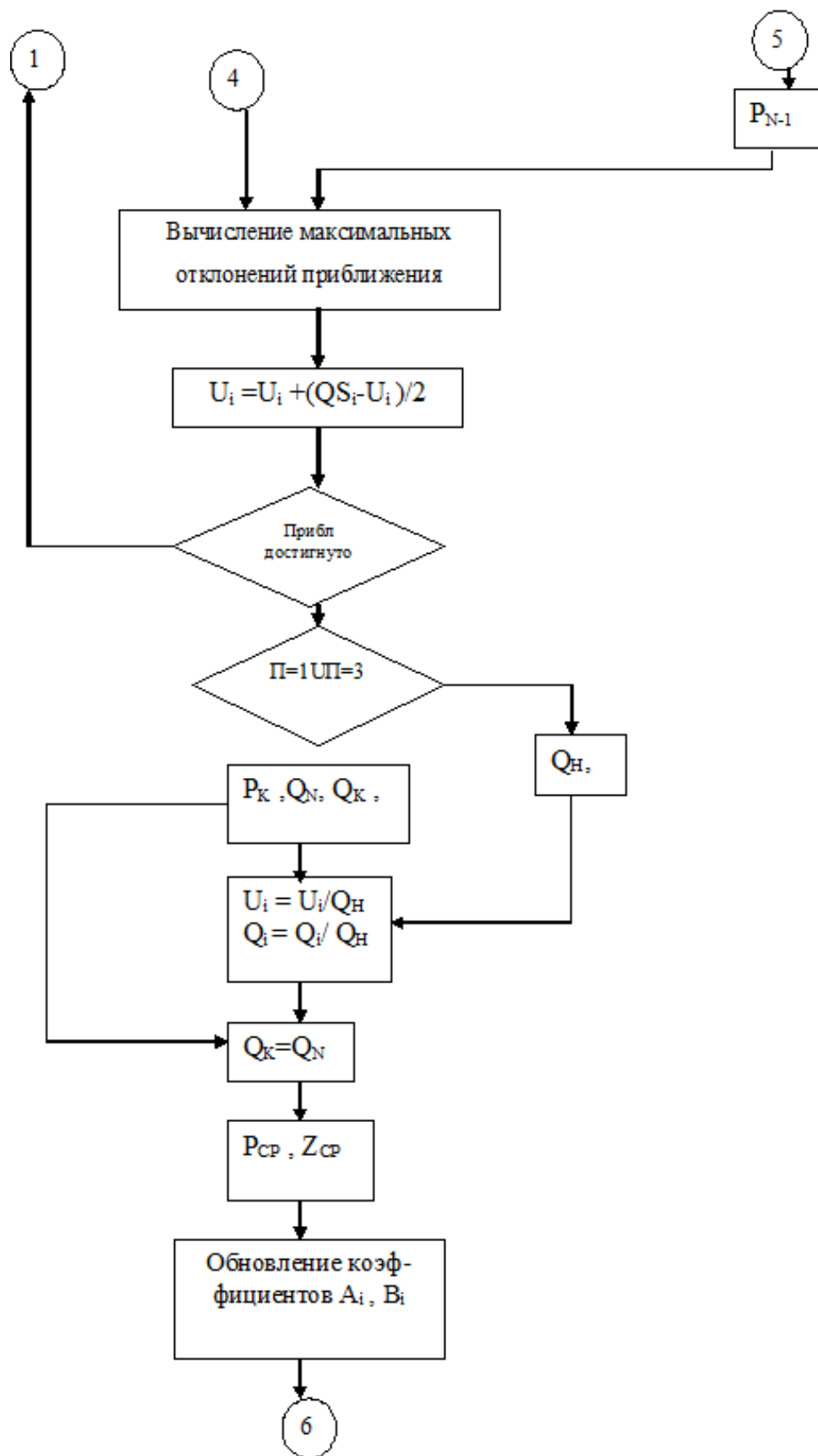


Рис. 11. Последовательность процедур в динамическом модуле

Заключение

Таким образом, разработан единый вычислительный алгоритм расчета статического и динамического режимов газодинамических расчетов параметров однониточного МГ с постоянным диаметром, учитывающий все режимы задания граничных условий и движения газа в реальных системах МГ.

Проведенные вычислительные эксперименты и их анализ показывают, что изменения давления, расхода газа и значения вводимой новой функции по времени, в основном, зависят от выбора граничных условий в начале и конце магистрального газопровода, и по длине – от количества отбираемого или подкачиваемого газа в особых точках, а также от диаметров, выбора коэффициента загрязненности элементарных участков и аккумулирующей способности магистрального газопровода. Ввод новой функции с большим количеством особых точек оказывается выгодным и это не влияет отрицательно на получение достоверных результатов в реальных условиях функционирования магистрального газопровода, а наоборот, облегчает создание единого вычислительного алгоритма расчета и его реализацию на ПЭВМ. Сопоставление полученных результатов с результатами других авторов [20], (а решено около 50 задач) приведенными в работах [2,3,9,17], показывает эффективность разработанных алгоритмов анализа и оперативного управления режимами работы магистрального газопровода. Сравнение результатов с данными работы [17] показало, что относительная ошибка в худшем случае составляет не более 0.3

Таким образом, на основе проведенных вычислительных экспериментов и анализа полученных результатов можно сделать вывод о целесообразности создания единой методики расчета анализа газодинамических параметров и оперативного управления линейных участков магистрального газопровода с отводами и подкачками газа при динамическом режиме газопотребления.

Конкурирующие интересы. Авторы заявляют, что конфликтов интересов в отношении авторства и публикации нет.

Авторский вклад и ответственность. Все авторы участвовали в написании статьи и полностью несут ответственность за предоставление окончательной версии статьи в печать. Окончательная версия рукописи была одобрена всеми авторами.

Список литературы/References

- [1] Берман Р. Я., Понкратов В. С., *Автоматизация систем управления магистральными газопроводами*, Недра, Л., 1978, 158 с. [Berman R. YA., Ponkratov V. S., *Avtomatizatsiya sistem upravleniya magistral'nyimi gazoprovodami*, Nedra, L., 1978, 158 pp.]
- [2] Бобровский С. А., Щербаков С. В., Гусейн-заде М. А., *Движение газа в газопроводах с путевым отбором*, Наука, М., 1972, 193 с. [Bobrovskiy S. A., Shcherbakov S. V., Guseyn-zade M. A., *Dvizheniye gaza v gazoprovodakh s putevym otborom*, Nauka, M., 1972, 193 pp.]
- [3] Бобровский С. А., Яковлев Е. И., Гарляускас А. И., Грачев В. В., *Трубопроводный транспорт газа*, Наука, М., 1976, 496 с. [Bobrovskiy S. A., Yakovlev Ye. I., Garlyauskas A. I., Grachev V. V., *Truboprovodnyy transport gaza*, Nauka, M., 1976, 496 pp.]
- [4] Берман Р. Я., Понкратов В. С., *Автоматизация систем управления магистральными газопроводами*, Недра, Л., 1978, 158 с. [Berman R. YA., Ponkratov V. S., *Avtomatizatsiya sistem upravleniya magistral'nyimi gazoprovodami*, Nedra, L., 1978, 158 pp.]
- [5] Вазан М., *Стохастическая аппроксимация*, М, 1972, 296 с. [Vazan M., *Stokhasticheskaya approksimatsiya*, M, 1972, 296 pp.]

- [6] Гарляускас А. И., *Математическое моделирование оперативного и перспективного планирования систем транспорта газа*, Недра, М., 1975, 160 с. [Garlyauskas A. I., *Matematicheskoye modelirovaniye operativnogo i perspektivnogo planirovaniya sistem transporta gaza*, Nedra, M., 1975, 160 pp.]
- [7] Гарляускас А. И., Галиуллин З. Т., Салимжанов Э. С., “Расчет оптимальных режимов компрессорной станции методом динамического программирования”, *Труды ВНИИ газа*. Т. 38, 41, Недра, М., 1970, 117-120. [Garlyauskas A. I., Galiullin Z. T., Salimzhanov E. S., “Raschet optimal’nykh rezhimov kompressornoy stantsii metodom dinamicheskogo programmirovaniya”, *Trudy VNIИ gaza*. V. 38, 41, Nedra, M., 1970, 117-120].
- [8] Грачев В. В., Щербаков С. Г., Яковлев Е. Е., *Динамика трубопроводных систем*, Наука, М., 1987, 638 с. [Грачев В. В., Щербаков С. Г., Яковлев Е. Е., *Динамика трубопроводных систем*, Наука, М., 1987, 638 pp.]
- [9] Грачев В. В., Гусейнзаде М. А., Ксенз Б. И., Яковлев Е. И., *Сложные трубопроводные системы*, Недра, М., 1982, 256 с. [Грачев В. В., Гусейнзаде М. А., Ксенз Б. И., Яковлев Е. И., *Сложные трубопроводные системы*, Недра, М., 1982, 256 pp.]
- [10] Гусейнзаде М. А., Никольская Н. С., Стаин А. М., “Распространение волны давления в трубопроводе при изменении количества попутной сосредоточенной подкачки”, *Сб. науч. тр. Инс. Нефти и газа*. Т. 229, М., 1991, 143-146. [Гусейнзаде М. А., Никольская Н. С., Стаин А. М., “Распространение волны давления в трубопроводе при изменении количества попутной сосредоточенной подкачки”, *Сб. науч. тр. Инс. Нефти и газа*. V. 229, M., 1991, 143-146].
- [11] Дидкин И. И., Попова О. М. Применение метода внутренних точек при расчете потокораспределения в гидравлической системе с регуляторами, *Жур. Кибернетика и системный анализ*, 2000, № 4, 173-178. [Дидкин И. И., Попова О. М. Применение метода внутренних точек при расчете потокораспределения в гидравлической системе с регуляторами, *Жур. Кибернетика и системный анализ*, 2000, № 4, 173-178].
- [12] Казак А. С., Седов В. И., Березина И. В., Видовский Л. А., Яковлев Е. И., *Оперативный контроль трубопроводных систем*, Недра, М., 1991, 244 с. [Kazak A. S., Sedov V. I., Berezina I. V., Vidovskiy L. A., Yakovlev Ye. I., *Operativnyy kontrol’ truboprovodnykh sistem*, Nedra, M., 1991, 244 pp.]
- [13] Коротаев Ю. П., Ширковский А. И., *Добыча, транспорт и хранения газа*, Недра, М., 1984, 486 с. [Korotayev Yu. P., Shirkovskiy A. I., *Dobycha, transport i khraneniya gaza*, Nedra, M., 1984, 486 pp.]
- [14] Кузнецов Н. Ю., “Расчет вероятности бесперебойной работы магистрального нефтепровода аналитико-статистическим методом (последовательная модель)”, *Ж. Кибернетика и системный анализ*, 2000, № 4, 132-145. [Kuznetsov N. Yu., “Raschet veroyatnosti bespereboynoy raboty magistral’nogo nefteprovoda analitiko-statisticheskim metodom (posledovatel’naya model’)”, *Zh. Kibernetika i sistemnyy analiz*, 2000, № 4, 132-145].
- [15] Кулибанов В. Н., “Методы расчет нелинейных систем”, *Жур. АиТ*, 1999, № 4, 41-47. [Kulibanov V. N., “Metody raschet nelineynykh sistem”, *Zhur. AiT*, 1999, № 4, 41-47].
- [16] Кучин Б. Л., *Оперативная информация в АСУ магистральных газопроводов*, Недра, М., 1979, 216 с. [Kuchin B. L., *Operativnaya informatsiya v ASU magistral’nykh gazoprovodov*, Nedra, M., 1979, 216 pp.]
- [17] Новоселов В. Ф., Гольянов А. И., Муфтахов Е. М., *Типовые расчеты при проектировании и эксплуатации газопроводов*, Учебное пособие для вузов, Недра, М., 1982, 136 с. [Novoselov V. F., Gol’yanov A. I., Muftakhov Ye. M., *Tipovyye raschety pri proyektirovani i ekspluatatsii gazoprovodov*, Uchebnoye posobiye dlya vuzov, Nedra, M., 1982, 136 pp.]
- [18] Понкратов В. С., Берман Р. Я., *Разработка и эксплуатация АСУ газотранспортными системами*, Недра, Л., 1982, 255 с. [Ponkratov V. S., Berman R. Ya., *Razrabotka i ekspluatatsiya ASU gazotransportnymi sistemami*, Nedra, L., 1982, 255 pp.]
- [19] Рахимов Б. Х., Каримов Ф., Ходжаев Т. Т., “К вопросу определения и оценки уровня распределения газа в газораспределительной сети”, *Известия ВУЗов, серия Технические наук*, 2001, № 2-4, 3-6. [Rakhimov B. Kh., Karimov F., Khodzhayev T. T., “K voprosu opredeleniya i otsenki urovnya raspredeleniya gaza v gazoraspredelitel’noy seti”, *Izvestiya VUZov, seriya Tekhnicheskikh nauk*, 2001, № 2-4, 3-6].

- [20] Садуллаев Р., Ещанов М. А., Утеулиев Н. У., *Разработка адаптивных алгоритмов параметрической идентификации для статической и динамической моделей функционирования систем магистральных газопроводов*, Препринт АН РУз, НПО «Кибернетика», Р-3-180, 1997, 46 с. [Sadullayev R., Yeshchanov M. A., Uteuliye N. U., *Razrabotka adaptivnykh algoritmov parametricheskoy identifikatsii dlya staticheskoy i dinamicheskoy modeley funktsionirovaniya sistem magistral'nykh gazoprovodov*, Preprint AN RUz, NPO «Kibernetika», R-3-180, 1997, 46 pp.]
- [21] Садуллаев Р., Шамсиев Т. Б., “Структура и организация ППП газотермодинамических расчетов параметров сложных систем магистральных газопроводов”, *Алгоритмы: Сб. науч. тр. Труды НПО «Кибернетика» АН РУз*. Т. 59, 1986, 24-34. [Sadullayev R., Shamsiyev T. B., “Структура и организация ППП газотермодинамических расчетов параметров сложных систем магистральных газопроводов”, *Алгоритмы: Сб. науч. тр. Труды НПО «Кибернетика» АН РУз*. V. 59, 1986, 24-34].
- [22] Садуллаев Р., Шамсиев Т. Б. Пакет прикладных программ для решения класса задач трубопроводного транспорта газа, *Информационное сообщение*, 1991, № 499, 15. [Sadullayev R., Shamsiyev T. B. Paket prikladnykh programm dlya resheniya klassa zadach truboprovodnogo transporta gaza, *Informatsionnoye soobshcheniye*, 1991, № 499, 15].
- [23] Садуллаев Р., Хужаев И. К., Хуррамова Р. И., “Обобщение метода расчёта сложного рельефного газопровода при концентрированном отборе и подкачке газа”, *Вопросы вычислительной и прикладной математики*, Сборн. науч. тр. Т. 111, Ташкент, 2003, 160-169. [Sadullayev R., Khuzhayev I. K., Khurramova R. I., “Obobshcheniye metoda raschota slozhnogo rel'yefnogo gazoprovoda pri kontsentrirrovannom otbore i podkachke gaza”, *Voprosy vychislitel'noy i prikladnoy matematiki*, Sborn. nauch. tr. V. 111, Tashkent, 2003, 160-169].
- [24] Юфина В. А., *Трубопроводный транспорт нефти и газа*, Недра, М., 1978, 407 с. [Юфина В. А., *Трубопроводный транспорт нефти и газа*, Недра, М., 1978, 407 pp.]
- [25] Хренов Н. Н., Егурцев С. А., Поздняков А. П., Седых А. А., Клепанова Н. В., “Выбор диагностических параметров линейной части магистральных газопроводов”, *Тр. М.: Инс. нефти и газа*. Т. 216, 1989, 123-126. [Хренов Н. Н., Егурцев С. А., Поздняков А. П., Седых А. А., Клепанова Н. В., “Выбор диагностических параметров линейной части магистральных газопроводов”, *Тр. М.: Инс. нефти и газа*. V. 216, 1989, 123-126].
- [26] Хужаев И. К., Вагапов И. Х., Хуррамова Р. И., “Моделирование рельефных магистральных газопроводов при динамическом режиме транспорта газа”, *Сборник научных статей Международная научно-практическая конференция ИННОВАЦИЯ-2003*, Ташкент, 2003, 256-258. [Khuzhayev I. K., Vagapov I. Kh., Khurramova R. I., “Modelirovaniye rel'yefnykh magistral'nykh gazoprovodov pri dinamicheskom rezhime transporta gaza”, *Sbornik nauchnykh statey Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya INNOVATSIYA-2003*, Tashkent, 2003, 256-258].
- [27] Хуррамова Р. И., “Постановка задачи и математическая модель оптимального управления режимами работы систем магистральных газопроводов”, *Ж. Известия ВУЗов серия технических наук*, 1999, № 1, 79-83. [Khurramova R. I., “Postanovka zadachi i matematicheskaya model' optimal'nogo upravleniya rezhimami raboty sistem magistral'nykh gazoprovodov”, *ZH. Izvestiya VUZov seriya tekhnicheskikh nauk*, 1999, № 1, 79-83].
- [28] Хуррамова Р. И., “Исследования и разработка алгоритма газодинамических расчетов параметров магистральных газопроводов”, *Сборник научных статей Международная научно-практическая конференция ИННОВАЦИЯ-2001*, Ташкент, 2001, 273-275. [Khurramova R. I., “Issledovaniya i razrabotka algoritma gazodinamicheskikh raschetov parametrov magistral'nykh gazoprovodov”, *Sbornik nauchnykh statey Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya INNOVATSIYA-2001*, Tashkent, 2001, 273-275].
- [29] Чарный И. А., *Неустановившееся движение реальной жидкости в трубах*, Недра, М., 1975, 296 с. [Charnyy I. A., *Neustanovivsheyesya dvizheniye real'noy zhidkosti v trubakh*, Nedra, M., 1975, 296 pp.]
- [30] Садуллаев Р., Хуррамова Р. И., “Разработка алгоритма расчета и проведение вычислительных экспериментов для анализа функционирования и управления газотранспортными системами”, *Республиканская научная конференция Современные проблемы алгоритмизации и программирования*, 5-7 сентября, 2001 г., Ташкент, 252-253. [Sadullayev R., Khurramova R. I., “Razrabotka algoritma rascheta i provedeniye vychislitel'nykh eksperimentov dlya analiza funktsionirovaniya i upravleniya gazotransportnyimi sistemami”, *Respublikanskaya nauchnaya konferentsiya Sovremennyye problemy algoritimizatsii i programmirovaniya*, 5-7 sentyabrya, 2001 g., Tashkent, 252-253].

- [31] Садуллаев Р. и др., *Разработка и исследование оптимальных алгоритмов функционирования и управления многосвязных систем применительно к объектам добычи и транспорта нефти и газа.*, Заключительный отчет по программе ЗФ, № Гос. Регистрации 01200009312, Ташкент, 2002, 68 с.
- [32] Хужаев И. К., “Переходные процессы в негоризонтальных газопроводах”, *Вопросы вычислительной и прикладной математики*, Сб. науч. тр. ИК АН РУз. Т. 112, Ташкент, 2003, 109-112. [Khuzhayev I. K., “Perekhodnyye protsessy v negorizontaľnykh gazoprovodakh”, *Voprosy vychislitel'noy i prikladnoy matematiki*, Sb. nauch. tr. IK AN RUz. V. 112, Tashkent, 2003, 109-112].
- [33] Альтшуль А. Д., *Гидравлические сопротивления*, Недра, М, 1982, 224 с. [Al'tshul' A. D., *Gidravlicheskiye soprotivleniya*, Nedra, M, 1982, 224 pp.]

Список литературы (ГОСТ)

- [1] Берман Р.Я., Понкратов В.С. Автоматизация систем управления магистральными газопроводами. Л.: Недра. 1978. 158 с.
- [2] Бобровский С.А., Щербаков С.В., Гусейн-заде М.А. Движение газа в газопроводах с путевым отбором. М.: Наука. 1972. 193 с.
- [3] Бобровский С.А., Яковлев Е.И., Гарляускас А.И., Грачев В.В. Трубопроводный транспорт газа. М.: Наука. 1976. 496 с.
- [4] Берман Р.Я., Понкратов В.С. Автоматизация систем управления магистральными газопроводами. Л.: Недра. 1978. 158 с.
- [5] Вазан М. Стохастическая аппроксимация. М: 1972. 296 с.
- [6] Гарляускас А.И. Математическое моделирование оперативного и перспективного планирования систем транспорта газа. М.: Недра. 1975. 160 с.
- [7] Гарляускас А.И., Галиуллин З.Т., Салимжанов Э.С. Расчет оптимальных режимов компрессорной станции методом динамического программирования // Труды ВНИИгаза. М.: Недра. 1970. Вып. 38,41. С. 117-120.
- [8] Грачев В. В., Щербаков С. Г., Яковлев Е. Е. Динамика трубопроводных систем. М.: Наука. 1987. 638 с.
- [9] Грачев В. В., Гусейнзаде М. А., Ксенз Б. И., Яковлев Е. И. Сложные трубопроводные системы. М.: Недра. 1982. 256 с.
- [10] Гусейнзаде М. А., Никольская Н. С., Стаин А. М. Распространение волны давления в трубопроводе при изменении количества попутной сосредоточенной подкачки. Сб. науч. тр. Инс. Нефти и газа. М.: 1991. №229. С. 143-146.
- [11] Дидкин И. И., Попова О. М. Применение метода внутренних точек при расчете потокораспределения в гидравлической системе с регуляторами // Жур. Кибернетика и системный анализ. 2000. № 4. С. 173-178.
- [12] Казак А. С., Седов В. И., Березина И. В., Видовский Л. А., Яковлев Е. И. Оперативный контроль трубопроводных систем. М.: Недра. 1991. 244 с.
- [13] Кортаев Ю. П., Ширковский А. И. Добыча, транспорт и хранения газа. М.: Недра. 1984. 486 с.
- [14] Кузнецов Н. Ю. Расчет вероятности бесперебойной работы магистрального нефтепровода аналитико-статистическим методом (последовательная модель) // Ж. Кибернетика и системный анализ. 2000. № 4. С. 132-145.
- [15] Кулибанов В. Н. Методы расчет нелинейных систем // Жур. АиТ. 1999. №4. С. 41-47.
- [16] Кучин Б. Л. Оперативная информация в АСУ магистральных газопроводов. М.: Недра. 1979. 216 с.
- [17] Новоселов В. Ф., Гольянов А. И., Муфтахов Е. М. Типовые расчеты при проектировании и эксплуатации газопроводов. Учебное пособие для вузов. М.: Недра. 1982. 136 с.
- [18] Понкратов В. С., Берман Р. Я. Разработка и эксплуатация АСУ газотранспортными системами. Л.: Недра. 1982. 255 с.

- [19] Рахимов Б. Х., Каримов Ф., Ходжаев Т. Т. К вопросу определения и оценки уровня распределения газа в газораспределительной сети // Известия ВУЗов, серия Технические наук. 2001. № 2-4. С. 3-6.
- [20] Садуллаев Р., Ещанов М. А., Утеулиев Н. У. Разработка адаптивных алгоритмов параметрической идентификации для статической и динамической моделей функционирования систем магистральных газопроводов // Препринт АН РУз, НПО «Кибернетика», Р-3-180. Т.: 1997. – 46 с.
- [21] Садуллаев Р., Шамсиев Т. Б. Структура и организация ППП газотермодинамических расчетов параметров сложных систем магистральных газопроводов // Алгоритмы: Сб.науч.тр. Труды НПО «Кибернетика» АН РУз. 1986. Вып.59. С.24-34.
- [22] Садуллаев Р., Шамсиев Т.Б. Пакет прикладных программ для решения класса задач трубопроводного транспорта газа // Информационное сообщение. 1991. вып. 499. 15 с.
- [23] Садуллаев Р., Хужаев И. К., Хуррамова Р. И. Обобщение метода расчёта сложного рельефного газопровода при концентрированном отборе и подкачке газа // Вопросы вычислительной и прикладной математики: Сборн. науч. тр. Ташкент, 2003. вып. 111. С. 160-169.
- [24] Юфина В. А. Трубопроводный транспорт нефти и газа. М.: Недра. 1978. 407 с.
- [25] Хренов Н. Н., Егурцев С. А., Поздняков А. П., Седых А. А., Клепанова Н. В. Выбор диагностических параметров линейной части магистральных газопроводов // Тр. М.: Инс. нефти и газа. 1989. №216. С. 123-126.
- [26] Хужаев И. К., Вагапов И. Х., Хуррамова Р. И. Моделирование рельефных магистральных газопроводов при динамическом режиме транспорта газа // Сборник научных статей Международная научно-практическая конференция ИННОВАЦИЯ-2003. Ташкент, 2003. С. 256-258.
- [27] Хуррамова Р. И. Постановка задачи и математическая модель оптимального управления режимами работы систем магистральных газопроводов // Ж. Известия ВУЗов серия технических наук. 1999. №1. С. 79-83.
- [28] Хуррамова Р. И. Исследования и разработка алгоритма газодинамических расчетов параметров магистральных газопроводов // Сборник научных статей Международная научно-практическая конференция ИННОВАЦИЯ-2001. – Ташкент, 2001. С. 273-275.
- [29] Чарный И. А. Неустановившееся движение реальной жидкости в трубах. М.: Недра. 1975. 296 с.
- [30] Садуллаев Р., Хуррамова Р. И. Разработка алгоритма расчета и проведение вычислительных экспериментов для анализа функционирования и управления газотранспортными системами // Республиканская научная конференция Современные проблемы алгоритмизации и программирования. Ташкент, 5-7 сентября, 2001 г. С. 252-253.
- [31] Садуллаев Р. и др. Разработка и исследование оптимальных алгоритмов функционирования и управления многосвязных систем применительно к объектам добычи и транспорта нефти и газа. // Заключительный отчет по программе ЗФ, № Гос. Регистрации 01200009312. – Ташкент, 2002. – 68 с.
- [32] Хужаев И. К. Переходные процессы в негоризонтальных газопроводах // Вопросы вычислительной и прикладной математики: Сб.науч. тр. ИК АН РУз. Ташкент, 2003. Вып. 112. С. 109-112.
- [33] Альтшуль А. Д. Гидравлические сопротивления. М: Недра. 1982. 224 с.

MSC 35M10, 35M20

Research Article

Introduce of the auxiliary function for calculation and development of algorithms for functioning and management of main gas pipelines

R. I. Khurramova¹, B. E. Yuldashev²

¹ Tashkent Institute of Textile and Light Industry, Uzbekistan, 100100, Tashkent, st. Shokhzhahon, 5

² Tashkent Pediatric Medical Institute, Uzbekistan, 100140, Tashkent, st. Bogishamol, 223

E-mail: baxrom@rambler.ru

The relevance of the work is due to the need to find ways to improve work efficiency, as well as improving the mathematical and software procedures for the optimal development of pipeline networks, therefore, this article focuses on the analysis of mathematical models and the creation of computational algorithms for the operation and management of single-line and interconnected multi-line gas pipelines in dynamic gas transport mode, allowing to cover the processes occurring in pipeline systems in various situations. A generalized methodology has been developed for the operational control of the operating modes of single-line MGs with concentrated gas extraction and pumping, with variable diameters for a dynamic gas consumption regime for various tasks of boundary conditions at the CS input and output. A new function has been introduced that smooths flow discontinuities in elementary sections and during the transition from one diameter (or section) to another.

Key words: mathematical model, main gas pipeline, auxiliary function, algorithm, pipeline systems, gas consumption, dynamic mode, gas transport, static mode, gas, numerical method, sweep.

DOI: 10.26117/2079-6641-2020-31-2-92-116

Original article submitted: 10.04.2020

Revision submitted: 10.06.2020

For citation. Khurramova R. I., Yuldashev B. E. Introduce of the auxiliary function for calculation and development of algorithms for functioning and management of main gas pipelines. *Vestnik KRAUNC. Fiz.-mat. nauki.* 2020, **31**: 2, 92-116. DOI: 10.26117/2079-6641-2020-31-2-92-116

Competing interests. The authors declare that there are no conflicts of interest regarding authorship and publication.

Contribution and Responsibility. All authors contributed to this article. Authors are solely responsible for providing the final version of the article in print. The final version of the manuscript was approved by all authors.

The content is published under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru>)

© Khurramova R. I., Yuldashev B. E., 2020

Funding. This research received no specific grant from any funding agency in the public, commercial, or not-for-profit sectors