

## МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В НАПОРНЫХ СИСТЕМАХ ВОДОПОДАЧИ С НАСОСНЫМИ СТАНЦИЯМИ

Д.С. Бегляров, М.С.Али, И.А. Концевич (МГУП), М.С. Козлова,  
Е.А. Лентяева (ЗАО ПО "Совинтервод")

Для решения задач, связанных с изменением режима работы насосных агрегатов, наиболее пригодна методика, разработанная на кафедре "Насосы и насосные станции" МГУП /1, 2/.

Этой методикой расчета учитываются все основные факторы, влияющие на переходные процессы: конфигурация напорной системы водоподдачи; длины, диаметры и материал трубопроводов, их профили; скорости распространения ударных волн в трубопроводах; отборы воды в узлах системы; кавитационные разрывы сплошности потока, образующиеся в трубопроводах при уменьшении давления ниже значения предельного вакуума; характеристики насосов, двигателей, трубопроводной арматуры (запорной, предохранительной, специальной противоударной); инерция насосных агрегатов.

Для расчета переходных процессов в напорных системах водоподдачи принята следующая математическая модель.

Уравнения неустановившегося движения воды в трубопроводах используются в следующем виде:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{a^2}{g} \cdot \frac{\partial v}{\partial x} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + g \frac{\partial H}{\partial x} + \lambda \frac{|v|v}{2d} = 0. \quad (2)$$

Решение этих уравнений осуществляется по одной из модификаций метода характеристик. Для расчета используется схема с прямоугольной сеткой.

Трубопроводы схемы напорной системы разбиваются на участки, длины  $\Delta x$  которых принимаются такими, чтобы время  $\Delta t = \Delta x/a$  распространения волн по любому участку было бы одним и тем же.

Таким образом, длины расчетных участков  $\Delta x$  должны быть пропорциональны значениям скоростей  $a$  трубопроводов. Скорости  $a$  распространения волн в трубопроводах системы приняты неизменяющимися при переходных процессах. Фактически значения  $a$  уменьшаются при наличии в воде нерастворенного воздуха, что может быть учтено проведением вариантов расчетов со сниженными значениями  $a$ .

Условие  $\Delta t = \Delta x/a$  в методе характеристик приводит к необходимости при постоянном шаге по времени  $\Delta t$  округлять длины трубопроводов до  $0,5\Delta x$ , но зато использование этого метода имеет много преимуществ.

Прежде всего это возможность проводить расчеты при резких изменениях параметров переходных процессов, что, например, характерно для случаев, сопровождающихся образованием кавитационных разрывов сплошности потока.

Программы для ЭВМ получаются при использовании условия  $\Delta t = \Delta x/a$ , как правило, проще: расчет требует меньше затрат машинного времени.

Расчет по методике осуществляется для моментов времени, отличающихся на  $\Delta t$ , начиная с  $t=0$ , принимаемое за начало переходного процесса до любого заданного значения  $t_{ps}$ .

Неизвестные значения напоров  $H$  и скоростей движения воды  $v$  в сечениях, примыкающих к расчетной точке  $i$  для каждого расчетного момента времени  $j$ , определяются по следующим формулам, в которых используются значения волн  $\varphi$ , распространяющиеся по направлению оси координат и  $\psi$  – соответственно против этого направления.

Значение напора  $H_{i(i-1),j}$  и скорости  $v_{i(i-1),j}$ , в сечении примыкающем к расчетной точке  $i$  со стороны соседней точки  $i-1$  равны:

$$H_{i(i-1),j} = H_{i(i-1),0} + \varphi_{i(i-1),j} + \psi_{i,j} \quad (3)$$

$$v_{i(i-1),j} = v_{i(i-1),0} + g \frac{\varphi_{i(i-1),j} - \psi_{i,j}}{a_i}, \quad (4)$$

а значения напора  $H_{i(i+1),j}$  и скорости  $v_{i(i+1),j}$  в сечении примыкающем к расчетной точке  $i$  со стороны соседней точки  $i+1$  равны:

$$H_{i(i+1),j} = H_{i(i+1),0} + \varphi_{i,j} + \psi_{i(i+1),j}, \quad (5)$$

$$v_{i(i+1),j} = v_{i(i+1),0} + g \frac{\varphi_{i,j} - \psi_{i(i+1),j}}{a_i}, \quad (6)$$

где  $H_{i(i-1),0}$ ;  $v_{i(i-1),0}$  и  $H_{i(i+1),0}$ ;  $v_{i(i+1),0}$  – начальные значения напоров и скоростей в указанных выше сечениях;

$\varphi_{i(i-1),j}$  и  $\psi_{i(i+1),j}$  – волны, подошедшие к точке  $i$  в расчетный момент времени  $j$  от соседних точек  $i-1$  и  $i+1$ ;

$\varphi_{i,j}$  и  $\psi_{i,j}$  – волны, возникающие в точке  $i$  в момент времени  $j$  в результате подхода волн  $\varphi_{i(i-1),j}$  и  $\psi_{i(i+1),j}$ .

При распространении волн по расчетным участкам учитывается изменение их величины вследствие гидравлического сопротивления этого участка трубопровода на трение.

Следует отметить, что при используемой форме записи точка может быть любой точкой расчетной схемы.

Каждая напорная система может быть представлена состоящей из отдельных трубопроводов и узлов между ними, которые могут быть насосами, изменениями диаметра, разветвлениями, отборами воды, трубопроводной арматурой и т.д.

Для описания нестационарных процессов движения воды в трубопроводах, как уже указывалось, служат уравнения (1) и (2). В узлах задается связь между этими уравнениями, которой определяется условия отражения волн (краевые условия).

Каждому узлу расчетной схемы присваивается определенный номер. Принято, что нумерация начинается с нуля. За нулевой узел наиболее удобно принимать насосную станцию или насос. Порядок нумерации почти произволен – выбирается направление до любого конечного узла сети  $K$  и по этому направлению нумеруются все узлы расчетной схемы от 0 до  $K$ , затем выбирается следующее направление от любого занумерованного узла до следующего конечного и так далее до  $n$ -го последнего узла. Номер каждого трубопровода принимается равным большему номеру из двух узлов, которые он соединяет. Направление движения воды в трубопроводе считается положительным, если поток направлен от узла с меньшим номером к узлу с большим номером и наоборот.

Однако, поскольку в качестве исходных данных задаются расходы в узлах, а не в линиях схемы, то знак расхода определяется программным способом на ЭВМ.

Для расчета переходных процессов в каждом узле расчетной схемы задается соответствующее граничное условие.

Наиболее сложно задание граничных условий для узла "насос" и "насосная станция". Для этого узла кроме  $H_{0,j}$  и  $v_{0,j}$  (номер узла 0), которые в этих случаях означают напор и скорость движения воды в начале напорного трубопровода, являются также: расход воды через насос  $Q_p$ ; напор насоса  $H_n$ ; относительная частота вращения ротора агрегата  $\beta = n/n_0$ ; момент сопротивления насоса  $M_n$ ; момент, развиваемый электродвигателем  $M_d$ ; сумма волн  $\varphi_{0,j}$ .

В отдельных случаях неизвестными могут быть также расход воды из начала напорного трубопровода или, поступающий в начало трубопровода  $q$  и гидравлическое сопротивление напорной линии насоса  $S_n$ .

Для узлов, являющихся местами изменения диаметра, отборами воды, разветвлениями, условиями, определяющими отражение волн в них, является равенство нулю алгебраической суммы расходов воды в узле, включая отбираемый расход, и равенство напоров в сечениях трубопроводов, подходящих к узлу.

Таким образом, потери напора на местные сопротивления в узле не учитываются, что практически вполне допустимо ввиду их незначительности.

На трубопроводах могут быть установлены аэрационные клапаны, открывающиеся при снижении давления ниже атмосферного и впускающие воздух в трубопровод.

Закрытие этих клапанов происходит при увеличении давления выше атмосферного; вошедший в трубопровод воздух после закрытия клапана сжимается.

До образования некавитационного разрыва сплошности, то есть до снижения давления ниже атмосферного ( $P_{i,j} \geq 0$ ), отражение волн в точке  $i$  установки клапана не учитывается и таким образом:  $\varphi_{i,j} = \varphi_{i(i-1),j}$  и  $\psi_{i,j} = \psi_{i(i+1),j}$ .

При уменьшении давления ниже атмосферного ( $P_{i,j} < 0$ ) оно принимается равным атмосферному  $P_{i,j} = 0$  и значения волн  $\varphi_{i,j}$  и  $\psi_{i,j}$  определяются исходя из этого условия; при этом разность расходов воды в трубопроводах, сходящихся в узле, отрицательна.

При увеличении давления выше атмосферного ( $P_{i,j} > 0$ ) принимается, что клапан мгновенно закрывается, и воздух начинает сжиматься. Разность расходов воды в сходящихся в узле трубопроводах при этом положительна.

Процессы сжатия и расширения воздуха приняты изотермическими, то есть  $(P_i + P_a) \cdot W_i = const$ .

Аналогично описанному выше случаю осуществляется расчет сжатия и расширения воздуха при установке на трубопроводах водовоздушного резервуара (ВВР), называемого так же водовоздушным баком или котлом. Отличие в расчете заключается в том, что масса воздуха в ВВР остается постоянной с момента начала переходного процесса до его конца. Предусматривается учет ВВР индивидуально в отдельных узлах расчетной схемы.

При установке на трубопроводах дополнительных обратных клапанов при движении воды в обратном направлении клапаны закрываются и разделяют трубопроводы на отдельные части, в пределах каждой из которых статический напор относительно невелик, что значительно снижает давление при гидравлических ударах. Если считать, что закрытие обратного клапана происходит при снижении скорости движения до нуля, то условиями для расчета будут:  $v_{i(i+1)} \geq 0$  или  $Q_{i-1} = Q_{i+1}$  (при сохранении сплошности потока). Предусматривается возможность образования разрыва сплошности потока. Условиями расчета при этом являются: при отсутствии аэрационного клапана перед обратным клапаном –  $h_{i(i-1)} \geq h_{min}$ , а при установке аэрационного клапана –  $h_{i(i-1)} \geq 0$ .

При оборудовании обратного клапана обводной линией после его закрытия  $v_{i(i+1)}$  уже не будет равна нулю. Условием, связывающим напоры до и после обратного клапана, в этом случае будет:  $H_{i(i+1)} - H_{i(i-1)} = S_{ob} Q_i^2$ .

Для уменьшения давления при гидравлических ударах могут быть использованы сбросные предохранительные устройства, большинство из которых срабатывают при повышении давления сверх заданного  $P_{qr}$ , превышающего максимальное рабочее давление. Эти устройства открываются с некоторым запаздыванием  $t_{sv}$  и их закрытие после снижения давления должно происходить достаточно медленно, в противном случае оно может привести к возникновению дополнительного гидравлического удара.

Таким образом, при открытии за время  $t_{sv}$  гидравлическое сопротивление устройства изменяется от  $S_{sv=\infty}$  до  $S_{sv0}$  – соответствующему полному открытию, а при закрытии за время  $t_{sv}$  гидравлическое сопротивление изменяется от  $S_{sv0}$  до  $S_{sv=\infty}$ .

Разработанный в соответствии с принятыми математическими моделями переходных процессов в напорных системах водоподдачи алгоритм можно условно разделить на три части: первую, которой осуществляется ввод исходных данных и переработка их к виду, необходимому для проведения расчетов; вторую, которой предусматривается непосредственный расчет переходных процессов, и третью, которой осуществляется выдача результатов расчетов и анализ, определяющий переход к расчету следующего варианта или к окончанию расчетов.

Блок-схема последовательности расчетов первой части алгоритма показана на рис. 1.

Блок-схема непосредственного расчета переходного процесса и выдачи результатов приведена на рис. 2.

Ввод отдельных групп исходных данных осуществляется по определенным условиям, например, можно проводить расчеты одного и того же варианта с различными шагами  $\Delta x$ , изменяя для каждого последующего варианта только это значение или проводить варианты расчетов с различными скоростями распределения волн  $a$ , также изменяя только эти значения.

Предусмотрена возможность автоматического пересчета каталожных характеристик насосов для любых фактических значений частоты вращения и диаметра рабочего колеса.

Разбивка трубопроводов по длине на расчетные участки, вычисление начальных значений скоростей движения воды в трубопроводах и напоров в расчетных точках осуществляется автоматически.

Расчет для всех значений времени  $t$ , отличающихся друг от друга на  $\Delta t$ , выполняется последовательно от 0-ой до  $n$ -ой точки. В начальной (нулевой) точке, как правило, принимается расположенным насос или насосная станция, но эта точка может быть и другого типа, например, началом всасывающей трубы насоса при учете ее длины.

Для начальной точки определяются значения волны  $\varphi_{0,j}$ , скорости движения воды  $u_{0,j}$  и напора  $H_{0,j}$ , которые проверяются на максимум и минимум. После этого проверяется, является ли расчетная точка конечной (последней), и в этом случае осуществляется проверка на печать. При выполнении этого условия печатаются соответствующие времени  $t$  текущие значения.

Если точка не является конечной, осуществляется переадресация на единицу, то есть рассматривается следующая расчетная точка, которая может быть или промежуточной, или конечной.

Наиболее несложным для расчета промежуточной точки является случай, когда она "простая", то есть отражение волн в ней при отсутствии кавитационного разрыва сплошности потока не учитывается. После расчета для каждой из точек, начиная с 1-ой до  $n$ -ой вычисляется изменение волны  $\varphi$  и  $\psi$ , распространяющихся по расчетному участку, вследствие его гидравлического сопротивления, и управление передается к определению напора в  $i$ -ой точке с проверкой его на максимум и минимум.

Таким образом, расчет продолжается до принятого времени расчета.

После этого осуществляется печать экстремальных значений параметров переходного процесса и переход к расчету следующего варианта или расчет заканчивается.

## Выводы

1. Для возможности обоснованного применения средств защиты от недопустимых колебаний давления в напорных системах водоподачи с насосными станциями необходимо проведение расчетов переходных процессов.
2. На первом этапе необходимо провести расчеты переходных процессов, возникающих при изменении режима работы напорной системы водоподачи, и определить точки водовода, давление в которых превышает допустимые значения.
3. На втором этапе основные исходные данные дополняются данными для моделирования переходных процессов с учетом установки на водоводах различных средств защиты.

## Библиографический список

1. Бегляров Д.С. Повышение надежности и эффективности работы закрытых оросительных систем. М.: МГУП. 1996. 140 с.
2. Вишневский К.П. Переходные процессы в напорных системах водоподачи. М.: Агропромиздат. 1986. 135 с.

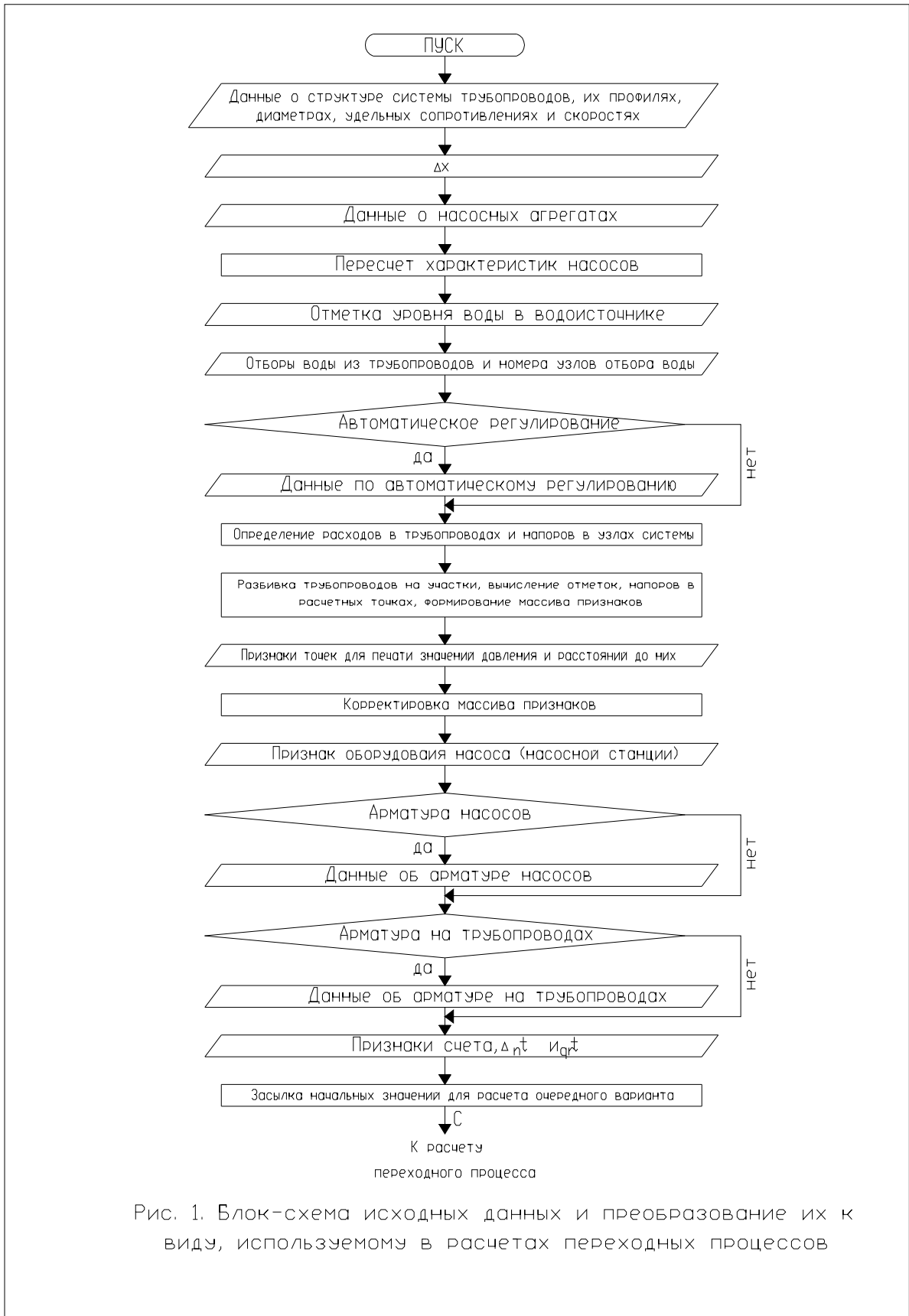


Рис. 1. Блок-схема исходных данных и преобразование их к виду, используемому в расчетах переходных процессов

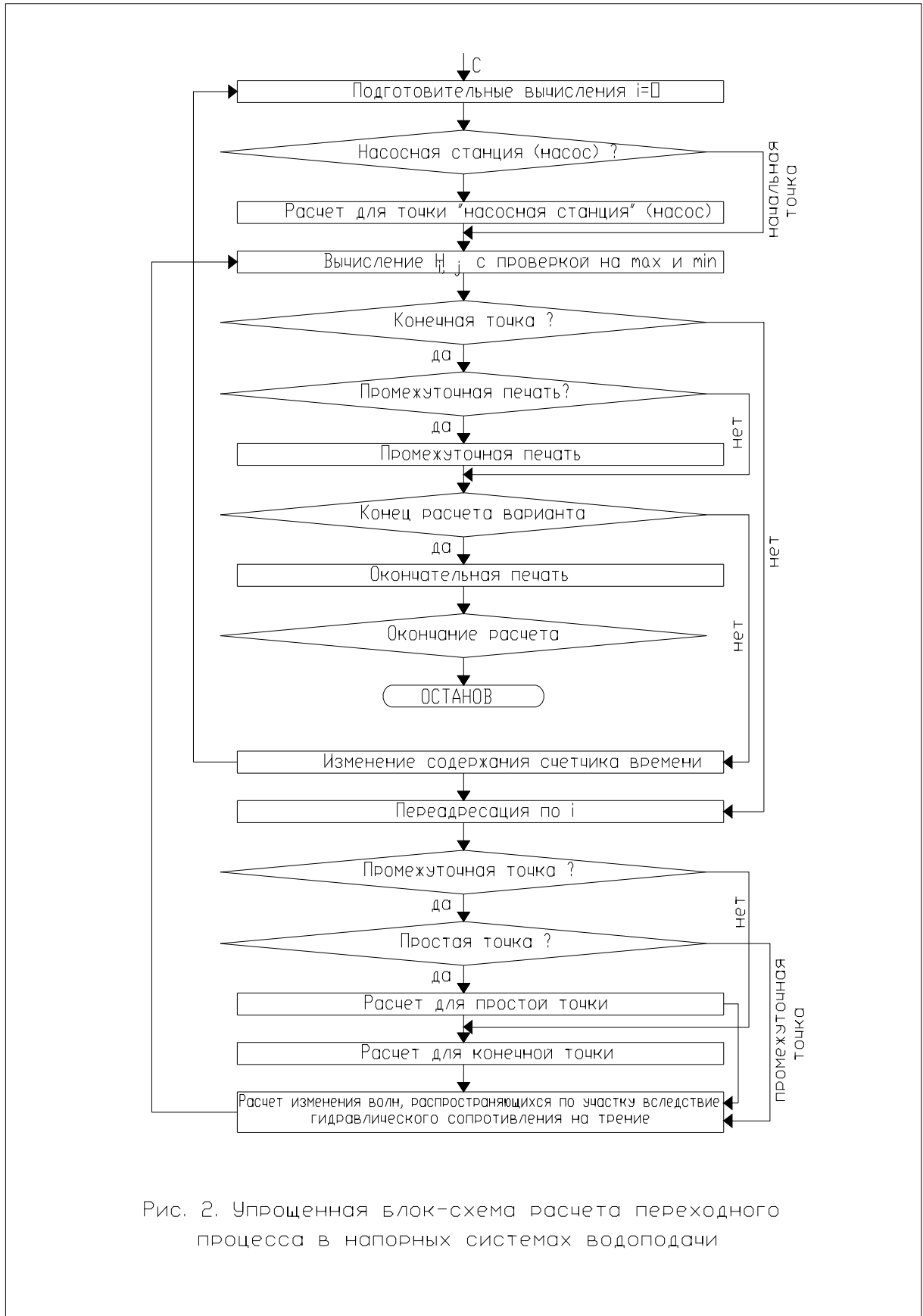


Рис. 2. Упрощенная блок-схема расчета переходного процесса в напорных системах водоподачи