

УДК 622.691.4

**ПРОЦЕСС УПРАВЛЕНИЯ СИСТЕМАМИ ТРАНСПОРТА ГАЗА  
С УЧЕТОМ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ**

**PROCESS CONTROL SYSTEMS WITH REGARD TO TRANSPORT  
GAS WAVE PROCESSES**

**Стрекалов А.В., Грачев С.И., Хусаинов А.Т.**

**ФГБОУ ВПО «Тюменский государственный нефтегазовый  
университет» г. Тюмень, Российская Федерация**

**A.V. Strekalov, S.I. Grachev, A.T. Khusainov**

**FSBEI NPE "Tyumen State Oil and Gas University",  
Tyumen, Russian Federation**

**e-mail: iq-tyumen@mail.ru**

**Аннотация.** Известно, что средствами в регулировании процессов извлечения газа и процессов течения газа в пластах являются технические устройства, размещаемые в скважинах и наземных гидросистемах.

Основной проблемой при регулировании является выявление взаимосвязи между целевыми технологическими параметрами и техническими показателями, которые требуется изменить.

В дополнении к этому, имеет огромное значение порядок выполнения операций по регулированию, т.е. последовательности изменения технических показателей определенных устройств (например, положение затворов запорной арматуры).

В системах газотранспорта в качестве технических средств, оказывающих регулирующее действие, используются "шайбы" или управляемая дросселирующая арматура.

Так как любое изменение в гидросистеме сетевой структуры ведет к перераспределению потоков в элементах, следует оценить насколько

сильное влияние оказывает на комплексный режим системы изменение показателей регулирующего устройства. Подобного рода задача ранее решалась в условиях стационарного течения в работах теории гидравлических цепей и в более поздних работах отраслевого направления.

Особенно важно отметить, что процессы перехода гидросистемы сетевой структуры из одного стационарного режима в другой являются не менее значимыми в плане учета при регулировании сложных систем.

Моделирование как средство контроля и планирования высокоэффективных мероприятий и оперативных действий по регулированию системами является уникальным инструментом воспроизведения динамических процессов течения с учетом взаимовлияния технических устройств и геологических объектов.

Основной предпосылкой для создания модели неустановившегося течения в сложных гидросистемах сетевой структуры является необходимость прогнозирования волновых явлений, которые обуславливают время выхода на установившийся режим, гидравлические удары и прочие явления нестационарного течения. В данной работе для оценки динамики состояния текучей среды (ТС) по длине трубопровода (или любого другого типа звена) предлагается метод решения задачи неустановившегося течения сжимаемой текучей среды с изменяющейся кинематической вязкостью в гидравлических системах сетевой структуры, аналогичных рассматриваемым в работе гидросистемам.

**Abstract.** It is known that the means for regulating gas extraction processes and processes of the gas flow in the formations are technical devices placed in the wells and surface hydraulic systems.

The main problem with the regulation is to identify the relationship between the target process parameters and technical indicators that you want to change.

In addition to this, is of great importance order of operations to regulate, ie sequence change technical parameters of certain devices (eg position of the valve shut-off valves).

In gas transportation systems as a technical means have a regulating effect, use the "puck" or controlled by the clearance fittings.

Since any change in the hydraulic network structure leads to a redistribution of flows in the elements, you should evaluate how strongly influenced by a complex system mode change control device performance. This kind of problem previously solved in a steady flow in the work of the theory of hydraulic circuits and in later works of industry trends.

It is particularly important to note that the processes of transition hydraulic network structure from one steady state to another are no less important to incorporate in the regulation of complex systems.

Modeling as a means of control and planning high-impact interventions and operational action on regulatory systems is a unique tool for playback of dynamic processes taking into account the mutual flow of technical devices and geological objects.

The main prerequisite for creating a model of unsteady flow in a complex hydraulic network structure is the need to predict the wave phenomena that determine the time to steady state, pressure surges and other phenomena of unsteady flow. In this paper, for the assessment of the state of the fluid (SF) along the length of the pipe (or any other type of link) propose a method for solving the problem of unsteady flow of a compressible fluid with a variable kinematic viscosity in the hydraulic systems of the network structure as those at issue in the hydraulic system.

**Ключевые слова:** газотранспорт, гидросистемы, нестационарное течение, гидравлические волны, энергосбережение.

**Key words:** gas transportation, hydraulic, unsteady flow, hydraulic wave, energy savings.

За основу решения поставленной задачи предлагается использовать метод конечных разностей или так называемый метод конечных элементов, который в предлагаемой модели сводится к разделению любого звена на  $N$  равных по объему участков (элементов) со следующими геометрическими характеристиками (рисунок 1).

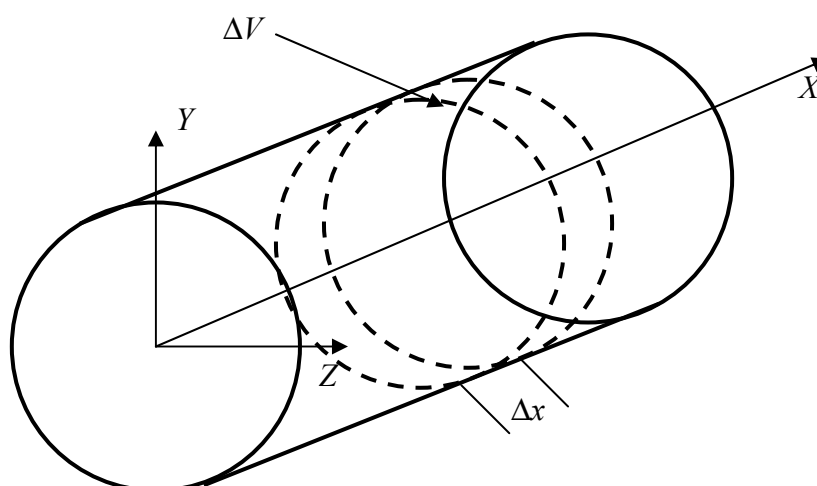


Рисунок 1. Схема расчета неустановившегося течения в трубах

Пространственная ориентация звена определяется узлами, к которым это звено подцеплено. Направление оси  $X$  соответствует вектору от узла начала до узла конца.

Примем следующие допущения: движение текучей среды может происходить только параллельно оси  $X$  (одномерный поток); деформация корпуса, ограничивающего растекание текучей среды, не учитывается. Рассматривается гидросистема из  $n$  звеньев и  $m$  узлов.

Начальные условия описываются в виде распределения давления по длинам всех звеньев на равное количество элементов  $N - P_{i,k}^{(0)}$ , где  $i$  – номер звена,  $k$  – номер элемента звена  $k=[0, N-1]$ .

Далее необходимо рассчитать массы компонентов в каждом элементе на момент времени  $t=0$ :

$$V_{i,k} = \sum_{c=1}^{C_n} \frac{m_{i,k,c}^{(t)}}{\rho_c(P_{i,k}^{(t)})}$$

$$s_{i,k,c}^{(t)} = \frac{u_{i,k,c}^{(t)}}{V_{i,k}} \quad (1)$$

где  $V_{i,k}$  – объем элемента  $k$  в звене  $i$ , м<sup>3</sup>;

$m_{i,k,c}^{(t)}$  – масса компонента  $c$  в элементе  $k$  звена  $i$  на момент  $t$ , кг;

$P_{i,k}^{(t)}$  – давление в элементе  $k$  в звена  $i$  на момент  $t$ , Па;

$\rho_c(P)$  – функция плотности от давления для компонента  $c$ , кг/м<sup>3</sup>;

$s_{i,k,c}^{(t)}$  – показатель насыщенности компонентом  $c$  объема элемента  $k$  звена  $i$  на момент  $t$ , д.е.;

$C_n$  – количество компонентов в системе;

$u_{i,k,c}^{(t)}$  – объем, занимаемый компонентом  $c$  при текущем давлении в элементе  $k$  звена  $i$  на момент  $t$ , м<sup>3</sup>.

Таким образом, можно рассчитать объем и массу компонента  $c$  для элемента  $k$ , звена  $i$  и любого времени  $t$  (в том числе и  $t=0$  – начальное состояние) из следующих выражений, относительно известных насыщенностей и функция плотности от давления:

$$u_{i,k,c}^{(t)} = s_{i,k,c}^{(t)} V_{i,k}$$

$$m_{i,k,c}^{(t)} = \rho_c(P_{i,k}^{(t)}) \times u_{i,k,c}^{(t)} \quad (2)$$

Аналогичным образом рассчитываются текущее распределение кинематических вязкостей компонентов в элементах:

$$\rho_{i,k,c}^{(t)} = \rho_c(P_{i,k}^{(t)})$$

$$\nu_{i,k,c}^{(t)} = \nu_c(P_{i,k}^{(t)}) \quad (3)$$

Для расчета показателей динамики процесса течения будем исходить из следующих принципов: 1 – интервал времени прогнозирования разделим

на равные части  $-\Delta t$ , в течение которых распределение потоков в гидросистеме считается квазистационарным; 2 – расчет взаимобулавливающих показателей течения проводится последовательно согласно природе явления.

Рассмотрим порядок расчета относительно текущего состояния системы на момент  $t$ .

Первым этапом расчета на произвольный момент времени  $t$  является расчет текущего состояния компонентов ТС в элементах системы. Этому этапу соответствует последовательность действий, соответствующая расчету начальных условий, который показан выше (1–3).

Вторым этапом является нахождение сил действующих на компоненты ТС. Силами вызванных с одной стороны, перепадами давлений между элементами (в том числе и гидростатические перепады давления, обусловленные плотностями компонентов), а с другой стороны, силами трения компонентов о поверхность корпуса элементов.

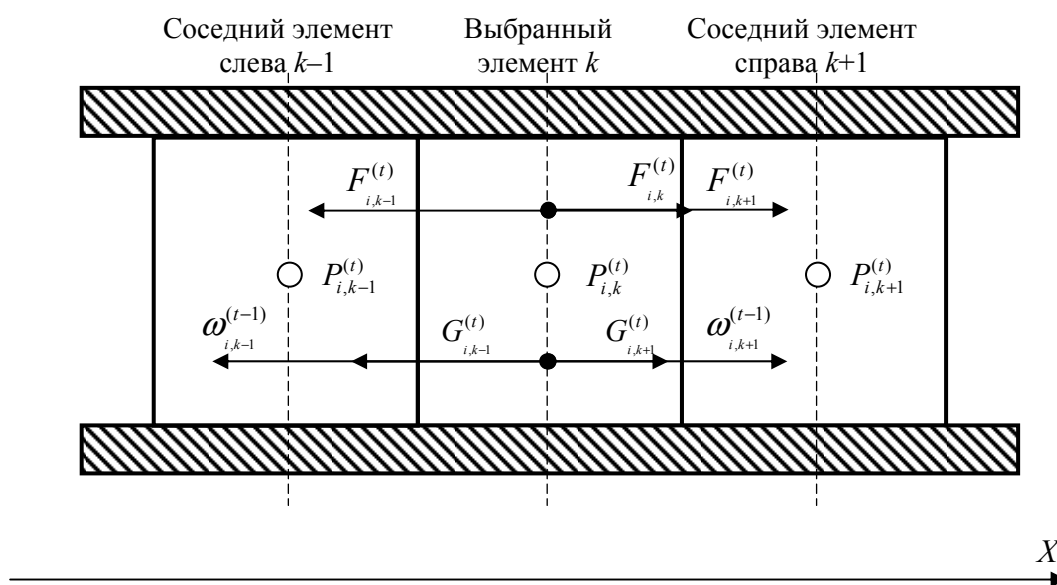


Рисунок 2. Схема расчета сил, ускорений и скоростей потоков в элементах

Силы, действующие на ТС в каждом элементе и обусловленные текущим перепадом давления между соседними элементами определяются из соотношений:

$$F_{i,k+1,c}^{(t)} = S_{i,k} \left( P_{i,k}^{(t)} - P_{i,k+1}^{(t)} + (z_{i,k} - z_{i,k+1}) \frac{\rho_c(P_{i,k}^{(t)}) + \rho_c(P_{i,k+1}^{(t)})}{2} g \right), \quad (4)$$

$$F_{i,k-1,c}^{(t)} = S_{i,k} \left( P_{i,k}^{(t)} - P_{i,k-1}^{(t)} + (z_{i,k} - z_{i,k-1}) \frac{\rho_c(P_{i,k}^{(t)}) + \rho_c(P_{i,k-1}^{(t)})}{2} g \right), \quad (5)$$

где  $P_{i,k}^{(t)} - P_{i,k+1}^{(t)}$ ,  $P_{i,k}^{(t)} - P_{i,k-1}^{(t)}$  – разность давлений в соседних элементах;

$g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;

$z_{i,k}$  – высота над уровнем моря точки центра масс элемента  $k$  звена  $i$ ;

$S_{i,k}$  – площадь сечения элемента, м<sup>2</sup>.

Общая сила будет определяться суммой сил:

$$F_{i,k,c}^{(t)} = F_{i,k+1,c}^{(t)} + F_{i,k-1,c}^{(t)}. \quad (6)$$

Особенно важно отметить, что последнее выражение далеко не всегда уместно, так как возможны условия неустановившегося течения, при которых  $|F_{i,k+1}^{(t)}| = |F_{i,k-1}^{(t)}|$ , а направления векторов противоположны  $\Rightarrow$

$$F_{i,k}^{(t)} = 0.$$

В этой связи, здесь и далее необходимо подразумевать под вектором силы (6) биполярный вектор, составленный из двух векторов – влево ( $k-1$ ) и вправо ( $k+1$ ).

На поток газа будет действовать сила трения, рассчитываемая на основе функции гидравлической характеристики звена:

$$f_{i,k,c}(q_{i,k,c}) = \frac{f_{i,c}(q_{i,k,c})}{\frac{V_i}{V_{i,k,c}}}, \quad (7)$$

где  $f_i(q)$  – зависимость перепада давления на концах звена  $i$  от объемного расхода ТС –  $q$ , установившегося в нем;

$\frac{V_i}{V_{i,k}}$  – отношение объема звена к объему элемента, по сути –

количество элементов в звене при постоянном диаметре;  $q_{i,k,c}$  – расход компонента  $c$  ТС в элементе  $k$ .

По сути, функция  $f_i(q)$  есть закон установившегося течения, записанный для каждого звена или элемента [1]. Это может быть формула Дарси-Вейсбаха (рисунок 3) для труб круглого сечения, закон фильтрации Дарси для пластовых условий и т.п.

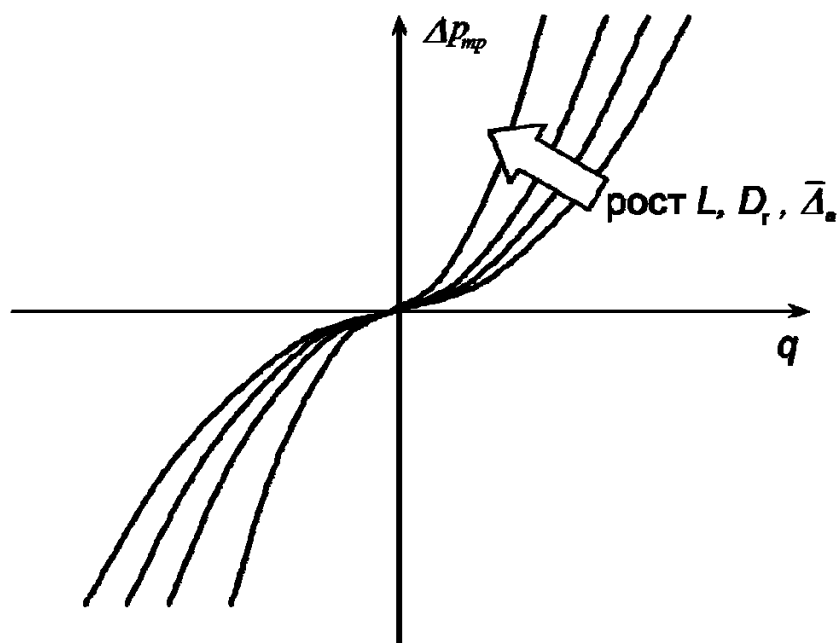


Рисунок 3. Типовая зависимость  $\Delta p = f_{тр}(q)$  для закона Дарси-Вейсбаха:

$L$  – длина;  $D_r$  – гидравлический диаметр;  $\bar{\Delta}_a$  – относительная шероховатость

Величина объемного расхода компонента ТС в элементе вдоль и против оси  $X$  (ориентации звена) определяется согласно средним (по сечению) скоростям течения через соответствующие грани (слева и справа соответственно):

$$q_{i,k+1,c}^{(t)} = S_k \omega_{i,k+1,c}^{(t)}, \quad q_{i,k-1,c}^{(t)} = S_k \omega_{i,k-1,c}^{(t)}, \quad \text{м}^3/\text{с}, \quad (8)$$

где  $\omega_{i,k-1,c}^{(t)}$  – средняя скорость компонента ТС при движении через левую грань, м/с;

$\omega_{i,k+1,c}^{(t)}$  – средняя скорость компонента ТС при движении через правую грань, м/с;



Таким образом, силы трения определяются из следующих соотношений:

$$G_{i,k+1,c}^{(t)} = -V_{i,k} \frac{f_{i,c}(S_k \omega_{i,k+1,c}^{(t)})}{V_i} S_k, \quad G_{i,k-1,c}^{(t)} = V_{i,k} \frac{f_{i,c}(-S_k \omega_{i,k-1,c}^{(t)})}{V_i} S_k. \quad (9)$$

В модели предполагается, что ТС может течь из выбранного элемента в соседние элементы одновременно или, наоборот, из соседних элементов в выбранный элемент. Данное условие предполагает учет «несплошности ТС» и разрыва потока. В соответствие с этим в любом элементе может появиться биполярные векторы ускорения, скорости и силы, действующие на ТС.

Для расчета ускорений необходимо рассчитать сумму сил, действующих на компонент ТС в точке центра масс каждого элемента:

$$R_{i,k+1,c}^{(t)} = G_{i,k+1,c}^{(t)} + F_{i,k+1,c}^{(t)}, \quad (10)$$

$$R_{i,k-1,c}^{(t)} = G_{i,k-1,c}^{(t)} + F_{i,k-1,c}^{(t)}. \quad (11)$$

Крайние элементы  $k=0$  и  $k=N-1$  рассчитываются исходя из связи с узлами, что в целом по модели гидросистемы сетевой структуры описывается матрицей инциденций (соединений или принадлежности).

На основании полученных сил можно рассчитать ускорения ТС в каждом элементе по каждому компоненту:

$$a_{i,k-1,c}^{(t)} = \frac{R_{i,k-1,c}^{(t)}}{m_{i,k,c}^{(t)}}, \quad a_{i,k+1,c}^{(t)} = \frac{R_{i,k+1,c}^{(t)}}{m_{i,k,c}^{(t)}}, \quad \text{м/с}^2. \quad (12)$$

Далее необходимо рассчитать скорости компонентов соответствующие следующему моменту времени  $(t+1)$ :

$$\omega_{i,k-1,c}^{(t+1)} = \omega_{i,k-1,c}^{(t)} + a_{i,k-1,c}^{(t)} \Delta t, \quad \omega_{i,k+1,c}^{(t+1)} = \omega_{i,k+1,c}^{(t)} + a_{i,k+1,c}^{(t)} \Delta t, \quad \text{м/с}. \quad (13)$$

Найденные скорости обуславливают новые  $(t+1)$  объемные и массовые расходы через левую и правую грани элемента:

$$M_{i,k-1,c}^{(t+1)} = \rho_c \left( P_{i,k,c}^{(t)} \right) \omega_{i,k-1,c}^{(t+1)} S_{i,k}, \text{ кг/с}, \quad (14)$$

$$M_{i,k+1,c}^{(t+1)} = \rho_c \left( P_{i,k,c}^{(t)} \right) \omega_{i,k+1,c}^{(t+1)} S_{i,k}, \text{ кг/с}. \quad (15)$$

Четвертым этапом является расчет давлений в элементах, величины которых изменяются из-за перетоков между элементами – ранее вычисленных массовых расходов по направлениям [2].

Для однокомпонентного состава ТС давление в элементе соответствующее времени  $(t+1)$  будет рассчитываться через функцию давления от плотности ТС –  $\varphi_c(\rho)$  (т.е. функцию обратную  $\rho_c(p)$  для компонента  $c$ ) при условии постоянства объема элемента. Например, давление, соответствующее текущей плотности  $\rho_{i,k,c}^{(t+1)}$  будет определяется из формулы:

$$P_{i,k,c}^{(t+1)} = \varphi_c \left( \rho_{i,k,c}^{(t+1)} \right). \quad (16)$$

Для нахождения текущей плотности необходимо знать массу ТС в элементе после «притока/оттока»:

$$\rho_{i,k,c}^{(t+1)} = \frac{m_{i,k,c}^{(t)} + J_{i,k,c}^{(t)}}{V}, \quad (17)$$

где  $J_{i,k,c}^{(t)} = \sum_{y=-1}^{+1} -M_{i,k+y,c}^{(t)} \Delta t$  – суммарная масса поступаемого компонента  $c$  в элемент  $k$  звена  $i$ . В последнем,  $y$  – направления, вдоль которых рассматривается поток компонента ТС.

Для случая одномерного (в пределах звена) течения – вдоль оси звена (оси  $X$ ):

$$J_{i,k,c}^{(t)} = -M_{i,k-1,c}^{(t)} \Delta t - M_{i,k+1,c}^{(t)} \Delta t, \text{ кг}. \quad (18)$$

Знак « $\rightarrow$ » обусловлен тем, что при положительных векторах силы, ускорения и скорости потоки ТС направлены из центра элемента к его

граням, т.е., грубо говоря, на выход ТС из элемента.

Далее расчет переходит к первому этапу со смещением времени на величину  $\Delta t$  и ранее рассчитанными скоростями и массовыми расходами компонентов ТС.

Начальные давления в звеньях приняты равными 1 МПа. Как видно из рисунка 4, после передачи давлений на концы звеньев (20 МПа в нижнем звене и 10 МПа в верхнем) происходит постепенное перераспределение давления с эффектами гидравлических волн. После 9,9 секунд устанавливается квазистационарный режим (на рисунке 4 отмечены величины объемных расходов, соответствующие установившемуся течению).



а)



б)

Рисунок 6. Результаты модели нестационарного течения – распределение давления по длине звена  $i=0$ : а – после 1,62 секунды; б – после 4,5 секунды

Далее рассмотрим факторы динамики состояния ТГ сетевой структуры на примере лучевой схемы или отдельных участков трубопроводной сети [3].

Показателем выхода системы на стационарный режим является относительное изменение скорости во времени не более 0,1 %, и относительное изменение давления не более 0,1 %. Для начала необходимо провести вычислительный эксперимент на наиболее простой структуре.

Начальное давление по длине трубы равно 1 МПа. Проследим динамику давлений по длине трубы после создание мгновенного импульса давления (30 МПа) на концах трубопровода.

На рисунке 5 показаны графики изменения давления по длине трубопровода.

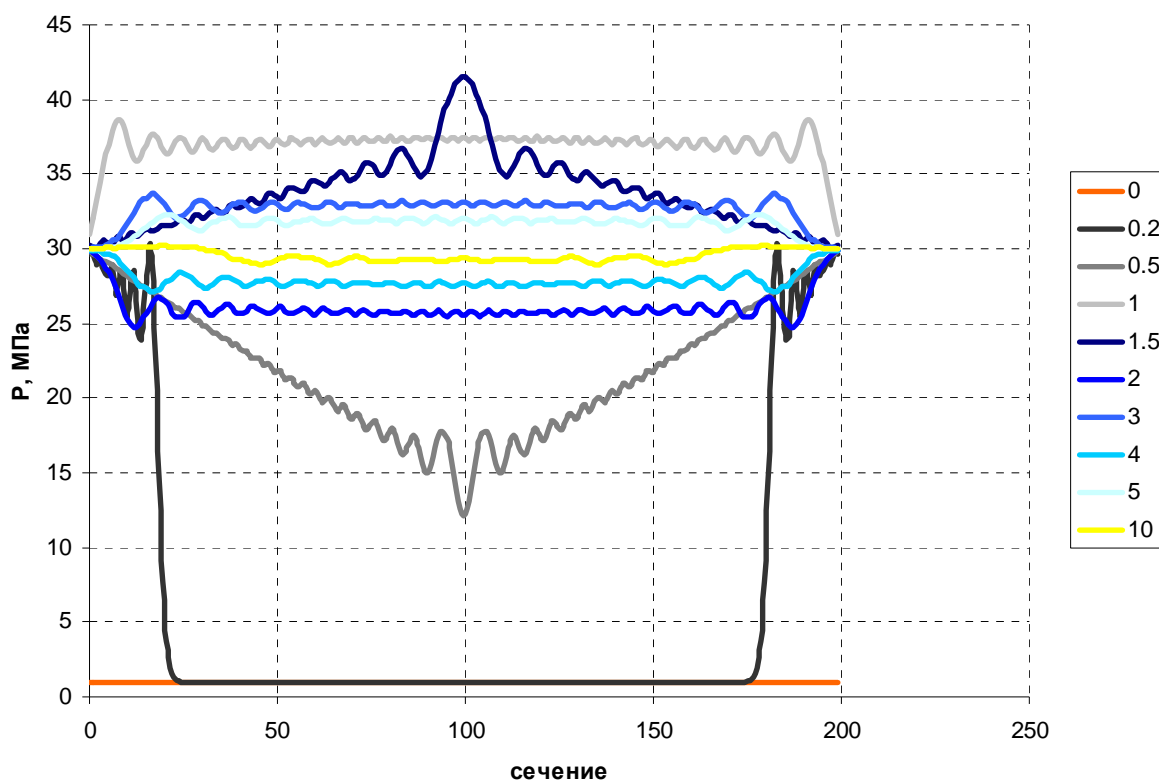


Рисунок 5. Динамика распределения давления по длине трубопровода (каждая линия соответствует времени от начала импульса, сек)

Из графика (время 0,2 сек.) видно, что импульс давления, созданный на концах трубопровода распространяется симметрично на встречу друг-другу. К моменту времени 1,5 сек., волны давления сталкиваются в середине трубопровода, что сопровождается резким ростом амплитуды и снижением периода колебаний в зоне столкновения.

Далее видно, как с течением времени амплитуда колебаний снижается и давление в трубопроводе начинает выравниваться ко времени 10 с.

Наиболее сильным и опасным является гидравлический удар (время 1,5 сек) сопровождающийся ростом давления на 40% выше, чем давление импульса на концах трубопровода [4,5,6].

Окончательное выравнивание давления в пределах 0,1% прослеживается через 18 с.

В гидросистемах сетевой структуры волновые явления, строго говоря, уникальны для различных структур и свойств элементов, в частности, длин, шероховатостей и диаметров трубопроводов.

Более того, характер распространения гидравлических волн обусловлен не только схемой соединения элементов, но порядком создания импульсов.

На рисунке 6 показаны проявления гидроволн для звена № 1. Здесь хорошо просматривается то, что вектор распространения волны изменяется на противоположный. Это, грубо говоря, обусловлено тем, что импульсы давлений от концевых (активных) узлов распространяются с разной скоростью и при их встрече возникает гидравлический удар, который изменяет распределение скоростей и ускорений.

График давления на момент времени 5 с демонстрирует потенциальное «стремление» системы выйти на установившийся режим при росте давления (слево-направо) в данном звене. Однако, остальные гидроволны в соседних звеньях «препятствуют» этому и, в конечном итоге, на момент 10 с, в звене устанавливается режим с противоположным распределением давления – падением давления (слево-направо).

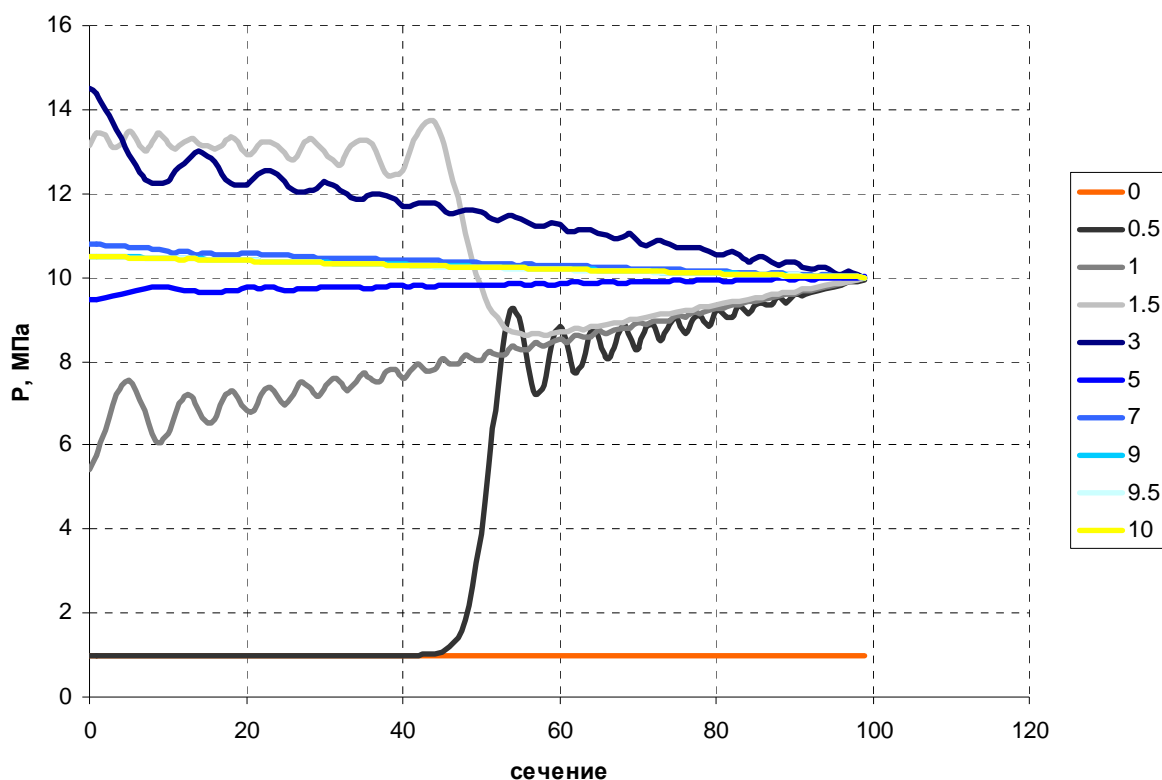


Рисунок 6. Динамика распределения давления в звене № 1

Описанные выше явления, которые демонстрируются на разработанной модели, также проявляются в реальных системах [7].

Около 65 % всех порывов на промышленных трубопроводах приходится на случаи, когда проводятся мероприятия по регулированию системы (запуск/остановка насосов, смена штуцеров, открытие/закрытие задвижек и т.п).

В связи с тем, что для планирования технологии и техники регулирования ТГ требуется оценка времени выхода системы на стационарный режим, необходимо разработать метод оперативной оценки данного фактора.

На основании проведенного выше анализа предлагается эмпирическая формула для расчета времени необходимого для выхода системы на стационарный режим:

$$\delta = B\eta(\bar{D}) \frac{L}{\Psi^A} \left[ \ln(\bar{\beta}) + 1 \right] e^{\frac{\bar{q}}{\Delta \nu} \varphi} \quad (19)$$

где  $\bar{q}$  – средний расход газа до возмущения, м<sup>3</sup>/с;

$\Delta$  – абсолютная шероховатость, м;

$\nu$  – кинематическая вязкость, м<sup>2</sup>/с;

$L$  – суммарная длина трубопроводов, м;

$\varphi$  – коэффициент пропорциональности равный 10<sup>-7</sup>;

$B$  – коэффициент пропорциональности равный 10<sup>-2</sup>;

$\bar{\beta} = \frac{\beta}{\beta^*}$  – относительная сжимаемость равная отношению текущей

сжимаемости к сжимаемости  $\beta^* = 1.0$  1/ГПа при этом  $\beta > \beta^*$ ;

$\eta(\bar{D})$  – вспомогательная функция, с/м;

$A$  – коэффициент пропорциональности равный 1 д.е.;

$\Psi$  – средний относительный скачок давления во всех точках возбуждения:

$$\Psi = \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - P_0)}{NP_0}, \quad (20)$$

где  $N$  – количество узлов, в которых изменяется давление;

$P_i$  – новое давление в узле, МПа;

$P_0$  – давление в остальных узлах и звеньях системы.

В формуле для расчета времени выхода системы на стационарный режим функция –  $\eta(\bar{D})$  должна вычисляться по формуле:

$$\eta(\bar{D}) = \frac{1}{\lambda} \left( 1.6 \frac{1}{\bar{D}^{0.83}} + 8.2 \bar{D}^{0.79} \right), \quad (21)$$

где  $\bar{D} = \frac{\sum_{i=1}^{n_t} D_i}{n_t} \frac{1}{d}$  – относительный средний диаметр трубопроводов в ТГ.

$d$  – условный стандартный диаметр равный 0,1 м;

$D_i$  – внутренний диаметр трубопровода звена  $i$ ;

$n_i$  – количество трубопроводов;

$\lambda$  – коэффициент пропорциональности равный 3000 м/с.

Так как наиболее весомыми параметрами выхода системы на стационарный режим (время стабилизации) являются средний диаметр и суммарная длина трубопроводов.

### **Заключение**

1. Разработанная модель нестационарного течения и фильтрации сжимаемого газа, позволяет оценивать динамические процессы, как в технических трубопроводных системах и скважинах, так и в условиях продуктивного пласта.

2. Диагностика разработанной модели показала, что ранее не учитываемый показатель фильтрации – ускорение обуславливает формирование гидравлических волн при запуске добывающих скважин.

3. Вычислительные эксперименты позволили дать приближенную формулу для расчета критерия выхода гидросистем сетевой структуры на стационарный режим – время стабилизации.

### **Список используемых источников**

1 Стрекалов А.В. Математические модели гидравлических систем для управления системами поддержания пластового давления. Тюмень: ОАО Тюменский дом печати, 2007. 664 с.

2 Стрекалов А.В. Модель гидросистемы поддержания пластового давления // Известия Томского политехнического университета. 2011. Т. 318. № 1. С. 123–127.



3 Программный комплекс гидродинамического моделирования природных и технических систем "Немезида Гидрасим" / С.И. Грачев, А.В. Стрекалов: Свидетельство о государственной регистрации программы ЭВМ №2014614505. 2014.

4 Стрекалов А.В., Королев М.С., Фоминых О.В., Модель системы поддержания пластового давления // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2010. №2. URL: [http://www.ogbus.ru/authors/Strekalov/Strekalov\\_3.pdf](http://www.ogbus.ru/authors/Strekalov/Strekalov_3.pdf).

5 Стрекалов А.В., Морозов В.Ю.. Влияние нестационарных процессов на закономерности фильтрации в пористых средах // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2010. №2. URL: [http://www.ogbus.ru/authors/Strekalov/Strekalov\\_2.pdf](http://www.ogbus.ru/authors/Strekalov/Strekalov_2.pdf).

6 Пуртова И.П., Стрекалов А.В. Савастьин М.Ю. Анализ и интерпретация динамики режимов работы скважин// Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2007. №6. С. 34–36.

7 Harten A. , Engquist B., Osher S, Chacravathy S. R. Uniformly High Order Accurate Essentially Noil-Oscillatory Schemes, // J. Comp. Phys. 1987. Vol. 71. N2. P. 231–303.

## References

1 Strekalov AV Mathematical models of hydraulic systems to control systems to maintain reservoir pressure. Tyumen: Tyumen house of the press, 2007. 664 p. [in Russian].

2 Strekalov AV Model hydraulic reservoir pressure maintenance // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. 2011. T. 318. № 1. pp 123-127. [in Russian].

3 Program complex hydrodynamic modeling of natural and technical systems "Nemesis Gidrasim" / SI Grachev, AV Strekalov: Certificate of state registration of computer programs №2014614505. 2014. [in Russian].

4 Strekalov AV Korolev MS OV Fomin, Model reservoir pressure maintenance system // Electronic Scientific Journal “Oil and gas business”. 2010. №2. URL: [http://www.ogbus.ru/authors/Strekalov/Strekalov\\_3.pdf](http://www.ogbus.ru/authors/Strekalov/Strekalov_3.pdf). [in Russian].

5 Strekalov AV Morozov V.Y. Effect of non-stationary processes on patterns of filtration in porous media // Electronic Scientific Journal “Oil and gas business”. 2010. №2. URL: [http://www.ogbus.ru/authors/Strekalov/Strekalov\\_2.pdf](http://www.ogbus.ru/authors/Strekalov/Strekalov_2.pdf). [in Russian].

6 Purtova IP, AV Strekalov MY Savastin Analysis and interpretation of the dynamics of modes wells // Geology, geophysics and development of oil and gas fields. №6.2007. S. 34-36. [in Russian].

7 Harten A., Engquist B., Osher S, Chacravathy SR Uniformly High Order Accurate Essentially Noil-Oscillatory Schemes, // J. Comp. Phys. 1987. Vol. 71. N2. P. 231-303. [in Russian].

### **Сведения об авторах**

#### **About the authors**

Стрекалов А.В., д-р техн. наук, проф. кафедры «Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений», ФГБОУ ВПО ТГНГУ, г. Тюмень, Российская Федерация

A.V. Strekalov, Doctor of Engineering Sciences, Professor of the Chair “Development and exploitation of oil and gas fields”, FSBEI NPE TSOGU, Tyumen, Russian Federation

Грачев С.И., д-р техн. наук., зав. кафедрой «Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений», ФГБОУ ВПО ТГНГУ, г. Тюмень, Российская Федерация

S.I. Grachev, Doctor of Engineering Sciences, Head of the Chair “Development and exploitation of oil and gas fields”, FSBEI NPE TSOGU, Tyumen, Russian Federation

Хусаинов А.Т., канд. техн. наук, доцент кафедры «Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений», ФГБОУ ВПО ТГНГУ, г. Тюмень, Российская Федерация

A.T. Khusainov, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of the Chair “Development and exploitation of oil and gas fields”, FSBEI HPE TSOGU, Tyumen, Russian Federation

e-mail: iq-tyumen@mail.ru