mathematical model for the restoration of reserves and groundwater quality in conditions of a single-layer structure of aquifers. The studied problems of modeling the processes of formation and operation of recovery (GWI) in the conditions of a single-layer structure of the aquifer based on a single fuzzy-determined mathematical model of the interrelation between the hydrodynamic and hydrochemical regimes of the groundwater aquifer.

Keywords:groundwater abstractions, salt transfer, fuzzy-deterministic mathematical model of filtration, technological schemes of GWI, geofiltration process, highly mineralized groundwater, stratum strip.

УДК 532.513.1

Х.Х. Нишонов., Ф.Х. Нишонов., Д.С. Яхшибаев., С.И. Худайкулов

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ИМПУЛЬСОВ И ГИДРАВЛИЧЕСКОГО УДАРА

Приводятся методы расчёта гидравлических импульсов, гидравлического удара в открытых и закрытых гидравлических системах, определяются частотные характеристики импульсов, рассматривается частотный анализ элементов гидравлических систем.

Выбор математического метода для решения и конструирования гидравлических систем зависит от поставленной задачи и от характера гидравлических процессов, происходящих при работе системы (форма импульсов, наличие гидравлического удара и отраженных волн и. т. д.).

Во многих случаях достаточно оценки конструктивных размеров или параметров импульса, производительности насоса. В основе расчетов лежат следующие допущения:

1) Учитывая допущение, можно описать макроскопические процессы в гетерогенной смеси (например, конструирование систем или новых элементов систем; устранение нежелательных процессов в системе; исследование системы) путем применения методов механики сплошной среды, путем осреднения макроскопических параметров. Наряду с этими допущениями предполагается, что смеси каждой фазы среды, распределены во всех точках области, которые определяются дополнительными параметрами, такими, как объемная, молярная и массовая концентрация, а также учитывается возможность взаимного проникания [3].

В работе [3] впервые с учетом выше указанных допущений составлена замкнутая система уравнений для смесей сжимаемых сред, подобная движению жидкостей и газов в подвижной деформируемой среде. В этой работе предполагается, что в единице объема смеси многофазной среды находятся частицы всех включенных фаз с соответствующими механическими и геометрическими параметрами, такие как размер частиц, d_n, истинная и приведенная плотность частиц фаз ρ_{ni}, ρ_n, скорость фаз $\vec{V}_n$, напряжения $\vec{P}_n$, температура T_n и другие.

При исследовании гетерогенных сред необходимо учитывать условие совместного деформирования и движения фаз, которое учитывает структуру составляющих сред. Эти условия, когда эффекты незначительны (для газовзвеси, эмульсии, суспензии, жидкости с пузырьком, твердых тел при очень высоких давлениях) сводятся к уравнению, определяющему объемные содержания фаз f_n (условия равенства давлений фаз или не сжимаемости одной из фаз).

Уравнения сохранения массы, импульса и энергии в многоскоростной среде имеют вид:

$$\frac{\partial\rho_n}{\partial t}+\nabla\left(\rho_n\vec{V}_n\right)=\sum_j J_{jn}$$

$$\rho_n\frac{d_n\vec{V}_n}{dt}=\nabla^k\vec{\sigma}_n^k+\rho_n\vec{g}_n+\sum_{j=1}^{N}\left(P_{ij}-J_{ji}\vartheta_i\right) \qquad (1)$$

$$\rho_n\frac{d_n t\varepsilon}{dt}\left(u_n+\frac{V_n^2}{2}\right)=\nabla\left(c_n^{-0}-q\right)+\rho_n g_n\vec{V}_n+\sum_{j=1}^{N}\left[E_{ni}-J_{nj}\left(u_n+\frac{V_n^2}{2}\right)\right]$$

$$\sum f_n=1,\quad \underline{\rho_n=f_n\rho_{ni}}$$

Исходными уравнениями для расчета установившегося движения гетерогенной смеси служат уравнения гидродинамики.

2) Уравнение Эйлера показывает связь между скоростью, давлением, плотностью гетерогенной смеси и действующей силой. Для одномерной системы [3] оно имеет вид:

$$\frac{\partial\overline{V}}{\partial t}+\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x}=F \qquad (2)$$

где p -давление; $\bar{V}$ -скорость потока гетерогенной смеси; ρ - плотность гетерогенной жидкости; F -сила, действующая по оси потока $x-x$.

Уравнение неразрывности основано на свойствах элементарной струи потока: если форма струи не изменяется во времени; поверхность струи непроницаема и через нее не могут проникать частицы жидкости; во всех точках поперечного сечения скорость частиц жидкости одинакова.

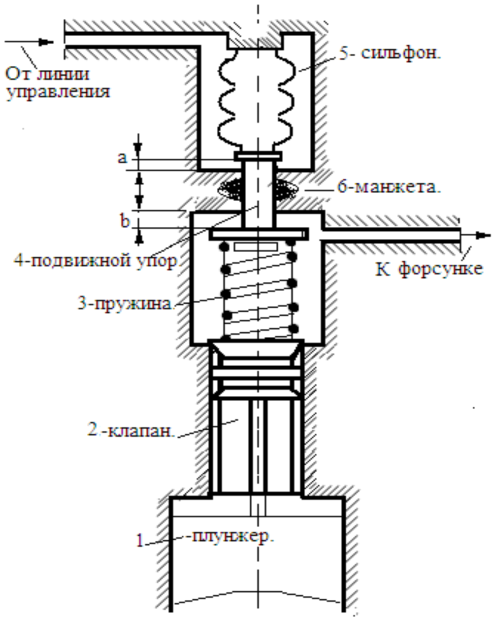

Рис 1. Управляемый нагнетательный клапан.

Для рассматриваемых одномерных гидравлических систем сохраняются свойства элементарной струи, что не вносит заметных искажений в расчеты. Тогда можно принять, что объем гетерогенной жидкости, поступающий в бесконечно малый элемент системы, между постоянными сечениями за время dt равен объему жидкости, вытекающей за то же время из этого элемента [5],

Как известно, уравнение Бернулли описывает энергетическое состояние элементарной струи жидкости и представляет собой сумму удельной кинетической $u_n + \frac{\bar{V}^2}{2g}$, потенциальной давления $\frac{p}{\gamma}$ и потенциальной энергий положения z, величина которых (полная удельная энергия) для элементарной струи постоянна,

$$\frac{\bar{V}^2}{2g} + \frac{p}{\gamma} + z = const; \qquad (3)$$

Здесь ϑ - скорость элементарной струи; p - давление; z -положение элемента струи.

Уравнение Бернулли с учетом вязкости имеет вид:

$$\frac{\bar{V}^2}{2g} + \frac{p}{\gamma} + z + h_u = const \qquad (4)$$

где h_u - потеря кинетической энергии на участке между двум сечением, иначе это можно записать как коэффициент при первом члене уравнения (3).

3) Когда движение жидкости неустановившееся с учетом как уравнений неразрывности и уравнение движение, так и волнового движения жидкости при переходных процессах для определения давления и скорости жидкости на концах трубопровода, можно воспользоваться волновым уравнением:

$$\frac{\partial^2 p}{dt^2} - \frac{1}{a^2}\frac{\partial^2 p}{\partial t} = 0 \qquad (5)$$

Уравнение (5) для расчета гидравлического удара приводятся к виду:

$$\frac{\Delta p}{\gamma} = -a\frac{\Delta \bar{V}_n}{g} \qquad (6)$$

С учетом приведенного модуля упругости $E_n = \frac{1}{E_{ж}} - \frac{d}{E\delta}$, где $E_{ж}$ - модуль упругости жидкости; E - модуль упругости трубопровода; a - скорость распространения колебаний в жидкости, имеем

$$a = \frac{\sqrt{\frac{E_{ж} g}{\gamma}}}{\sqrt{1 + \frac{E_{ж} d}{E\delta}}} \qquad (7)$$

Здесь числитель - скорость волны в жидкости, а знаменатель учитывает упругость стенок трубопровода. Из уравнения (5) получаем величину давления при гидравлическом ударе в нагнетательном управляемом канале (рис.):

$$\frac{dp}{\gamma} = a\frac{d\bar{V}}{g};\ dp = -\gamma a\frac{d\bar{V}}{g},$$

решая его, получим формулу Н.Е. Жуковского:

$$p - p_0 = -\frac{\gamma}{g}a\left(\bar{V} - \bar{\vartheta}_0\right) \qquad (8)$$

где p_0 и $\bar{V}_0$ - начальные давления и скорость. Формула (8) используется для расчета гидравлического удара, когда продолжительность импульса $t_u = \frac{2l}{a}$ больше времени возврата отраженной волны. Если при возврате волны конец трубопровода закрыт, т.е. скорость жидкости становится равной нулю (прямой удар), то давление удара будет

$$p = p_0 + \rho\bar{V}_0 a,$$

где ϑ_0 - начальная скорость жидкости. (Рис.1). При частично закрытом конце трубопровода $p = \rho\bar{V}_0 a\frac{t_u}{t_з}$ где t_u и $t_з$ - время импульса, и время закрытия. Приведенные уравнения используются для ориентировочных расчётов сечений трубопроводов, прочностных расчетов, выбора цикловой (за один импульс) производительности системы и т.д. Например, для установки гидроимпульсной промывки внутренний полостей крупных отливок необходимо давление гидроудара - $1 МПа$.

Требуется определить начальную скорость воды и производительность насоса Q, если

$$a = 1400\frac{м}{сек};\ p_0 = 0, \rho = 1\cdot 10^{-3}; p_0 = 0;$$

$$d_m = 0{,}01 м.$$

Для прямого удара получаем

$$\bar{V}_0 = a\frac{p}{\rho} \approx 0{,}7\frac{м}{с}, Q = \frac{\pi d_m^2 \bar{V}_0}{4} \approx 0{,}53\cdot 10^{4}\ \frac{м^3}{сек}.$$

Такой расчет не учитывает гидравлические и волновые потери, возможные расширения и сужения, отражение волн от конца трубопровода, промежуточные частичные отражения и.т. д.

По причинам, рассматриваемым выше, применение находят более узкие задачи, основанные на теории, пассивного четырехполюсника. При этом предполагается, что канал связи является непрерывным пространством с постоянными свойствами, обладающим массой и упругостью, а переменная скорость частицы жидкости однозначно связана с давлением в данной точке. При этих условиях участок трубопровода можно рассматривать как акустический фильтр с избирательностью по частоте.

Частота собственных колебаний жидкости в тупиковой камере с трубопроводом определяется уравнением резонатора Гельмгольца

$$f = \frac{a\sqrt{\frac{S}{Vl}}}{2\pi} = a\frac{\sqrt{\frac{q}{V}}}{2\pi}, \qquad (9)$$

где $q = \frac{S}{l}$ - проводимость; V - объем камеры. Например, для пульсатора с камерой у рабочего поршня при $\vartheta = 0{,}003 м^3$, $S = 0{,}001 м^2$, $l = 2 м$, заполненного маслом с $a = 1200\frac{м}{сек}$,

$$f = \frac{1200}{2\pi}\sqrt{\frac{0{,}001}{0{,}003\cdot 2}} = \frac{200}{2{,}5} \approx 80 Гц$$

Гасители колебаний рассчитываются также на основе допущения об одномерном движении потока в гидравлических системах, когда скорость всех частиц жидкости в сечении равна:

$$\bar{V} = \vartheta.$$

Этот же вывод следует из исследований [2,4,5] для трубопровода, если длина упругой волны превышает диаметр трубы в 1,7 раза и более, т.е. $\frac{\lambda}{d} \geq 1{,}7$ то по трубопроводу распространяется только плоская волна. При этом происходит даже выравнивание неоднородной скорости по сечению. Учитывая небольшой диаметр трубопроводов гидравлических систем ($D_н \leq 100 мм$) и частоту собственных колебаний ($f \leq 100 Гц$), согласно критерию Релея, волны импульса давления принимают плоскими продольными волнами. Тогда величина сглаживания пульсаций давления волнового фильтра определяется из выражения:

$$k_c = 10 lg\left[1 + 0{,}25\left(m - \frac{1}{m}\right)^2 sin^2 k_1 l\right],$$

где $m = \frac{S_2}{S_1}$ — отношение площади сечения камеры к площади сечения трубопровода; $k_1 = \frac{2\pi f}{a}$ — волновое число; l —длина камеры.

В США по методике NACA [1,2] коэффициент сглаживания пульсаций (k_c) давления в однокамерном гасителе определяется так:

$$k_c = \sqrt{1 + 0{,}25\left(m - \frac{1}{m}\right)^2 \sin k_1 l}.$$

Из этой формулы следует, что при увеличении диаметра камеры пульсация уменьшается. Так, для участка расширения трубопровода на линии нагнетания поршневого насоса высокого давления при $m = 100$, частоте пульсаций насоса $f = 10 Гц$ и длине $l = 0{,}1 м$ по формуле NACA $k_c \approx 1{,}05$. Действительно, расширитель на линии высокого давления, заполненный жидкостью с малой упругостью, пропускает основную частоту колебаний насоса. Амплитуды высоких частот, связанные с волновым движением жидкости, в таком гасителе значительно сглаживаются. Так, при $f = 200 Гц$ ($k_c \approx 1$) для камеры тех же размеров получаем сглаживание амплитуды колебаний в восемь раз.

Решение волнового уравнения (5) для исследования гидравлического удара в водопроводных трубах пишется в виде двух дифференциальных уравнений первого порядка [6]

$$\left.\begin{aligned} \frac{\partial \vartheta}{\partial t} &= \frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x} \\ \frac{\partial \vartheta}{\partial x} &= \frac{1}{a^2}\frac{\partial p}{\partial t} \end{aligned}\right\}$$

Решение системы уравнений можно представить в виде уравнения Даламбера:

$$p - p_0 = p_1\left(t - \frac{x}{a}\right) + p_2\left(t - \frac{x}{a}\right) \qquad (11)$$

$$\vartheta - \vartheta_0 = \frac{1}{a\rho}\left[p_1\left(t - \frac{x}{a}\right) + p_2\left(t + \frac{x}{a}\right)\right] \qquad (12)$$

Решение уравнений (11), (12) может быть записано для гармонических колебаний при $p_0 = pe^{j\omega t}$, $\vartheta_0 = \vartheta e^{j\omega t}$ в виде (9), и $z_0 = \frac{\rho a}{S_m}$ (без учета внутреннего трения).

В этом случае полное волновое сопротивление, деленное на S_m, получается из выражения акустического сопротивления:

$$z_a = \sqrt{\frac{r_a + j\omega M_1}{j\omega\alpha}} \quad (13)$$

где z_a; M_1 и α — соответственно гидравлическое сопротивление, масса и коэффициент сжимаемости жидкости с размерностью гидроакустических величин.

Если трение мало, то $z'_a = \sqrt{\frac{M}{\alpha}}$. При стоячей волне в бесконечно длинном трубопроводе волновое сопротивление — это отношение давления частиц жидкости в импульсе к скорости перемещения этих частиц в потоке $z_a = \frac{p_x}{\vartheta_x}$.

Литературы:

1.Васькевич Ф.А. Использование частотного метода для организации процесса топливоподачи.-В кн. «Судовые силовые установки», №10 Л., «Транспорт», 1973, с 53-67.

2. Могендович Е.М. «Гидравлические импульсные системы» Ленинград «Машиностроение», 1977.

3.Нигматуллин Р.И. Динамика многофазных сред. - М.: Наука, 1987. - T.I. –360с.

4. Нишонов Ф.Х., Худайкулов С.И. Моделирование ударного импульса жидкости в трубопроводе. Ташкент., Проблемы механика. 2015. 26-30 с.

5. Хамидов А.А., Худайкулов С.И. Теория струй многофазных вязких жидкостей. Ташкент- 2003» ФАН.

6. Хамидов., С.И. Худайкулов И.Э. Махмудов «Гидромеханика» ФАН-2008г. 340с.

Нишонов Файзулло Холмирзаевич
ассистент кафедры проектирования, строительство и эксплуатация инженерных коммуникаций Ташкентского архитектурно-строительного института.
Эл.почта:n.fayz_1988@mail.ru

Нишонов Хайрулло Холмирзаевич
Заместитель управлении среднего специализированного образования Наманганская область.
Эл.почта:n.fayz_1988@mail.ru

Худайкулов Савет Ишанкулович д.т.н. проф.
Научно-исследовательского института ирригации и водных проблем.
Эл.почта:Savet_1949@mail.ru

Яхшибаев Дониёр Султонбаевич Старшый преподователь кафедры Высшая математика Ташкентского университета информационных технологий.
Эл.почта:donik9202@mail.ru

H.H. Nishonov, F.Kh. Nishonov,
D.S. Yakhshibaev, S.I. Khudaykulov

Mathematical problem of the modeling hydraulic pulse and hydraulic blow. Happens to the methods a calculation hydraulic pulse, hydraulic blow in opened and closed hydraulic systems, is defined frequency features pulse and is considered frequency analysis element hydraulic systems.

УДК 001.891.573

Усманов Р.Н., Калимбетов Ж.К.

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ПАРАМЕТРОВ ДЕЙСТВУЮЩЕГО ВОДОЗАБОРА ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Рассмотрены вопросы нечетко-детерминированного и имитационного моделирования процессов формирования и эксплуатации водозаборов подземных вод при определении дебитов и количества скважин в условиях нечеткости исходной информации.

Ключевые слова: водозаборы подземных вод, нечеткие множества, термы, паводок, межень, дебит и количества скважин.

Введение. В условиях острой нехватки водных ресурсов на территориях, характеризуемых экологической напряженностью, искусственно создаваемые запасы подземных вод (ПВ) представляют собой одну из основных источников хозяйственно-питьевого водоснабжения населения.

Обоснование проектов ВПВ обычно осуществляется в условиях нехватки, неточности, неясности, неопределенности, нечеткости имеющейся исходной информации. Этим объясняется необходимость разработки информационной модели области фильтрации и процесса фильтрации, что является основой организации взаимосвязи между водозабором