

УДК 628.218

Диффузионное перемешивания жидкости

Погорелова А.С.

В работе рассматриваются вопросы выявления особенностей снижения надежности и состояния безопасности питьевой воды в системах водоснабжения, обусловленных изменениями гидродинамических параметров потока и бактериологических показателей воды в напорных водоводах, установление закономерностей изменения гидравлических и качественных показателей потока воды, разработка научно обоснованных предложений по созданию надежной и безопасной системы питьевого водоснабжения населения. Использование диффузионной теории позволяет создать гидравлические модели для установления среднего по живому сечению значения концентрации бактерий и давления воды вдоль водовода. Балансовые уравнения движения смеси способствуют оценке состояния питьевой воды в водоводе, а также разработке моделей регулирования характеристиками надежности и состоянием безопасности системы питьевого водоснабжения населенных пунктов. Нарушение гидродинамического и связанное с ним бактериологического режима потока воды в системе водоснабжения имеет особенность распространения по всей системе опасных для здоровья людей бактерий различного характера.

Ключевые слова: диффузионное перемешивание, вода, фаза, частица.

Diffusive mixing of liquids

Pogorelova A.S.

The paper addresses the issues of identifying the characteristic features, affecting the safety and security status of drinking water in water supply systems due to the changes in the hydrodynamic flow parameters and bacteriological parameters of water in the pressure conduits, as well as indentifying variation trends in hydraulic and quality parameters of the water flow, the development of evidence-based ideas to create a safe and secure drinking water supply for the people. Diffusion theory application makes it possible to create hydraulic models to identify the average value for the living section of bacteria concentrations and water pressure along the conduit. Balance equations of mixture movement facilitate the assessment of drinking water status in the conduit, as well as specifying regulation models by means of characteristics of reliability and safety status of drinking water supply system of settlements. The failures in hydrodynamic and involved bacteriological water flow mode of the water supply system can lead to spreading dangerous to human health bacteria of various kinds throughout the system.

Keywords: diffusive mixing, water, phase, particle.

Введение

Одним из наиболее ценных природных богатств является вода. Сложившийся весьма существенный дефицит водных ресурсов ещё более усугублялся их качественным истощением. Этот процесс весьма сложный и сопровождается засолением и загрязнением поверхностных и подземных вод.

Повышение минерализации вод происходит за счет увеличения концентраций ионов магния, натрия сульфатов и хлоридов. По этим

показателям, а также по общей жесткости, вода становится непригодной для использования в водоснабжении, а также и для орошения. Биологический вид загрязнения чаще связан с патогенными микробами и вирусами, нормированная часть которых учитываются при выборе источников централизованного хозяйственно-питьевого водоснабжения. Между тем обеспечение населения безопасной питьевой водой и повышение надежности функционирования систем питьевого водоснабжения

возможны только при условии научно-обоснованной оценки состояния и разработки эффективных мер по совершенствованию функционирования систем питьевого водоснабжения.

Цель работы: рассмотреть вопросы выявления особенностей снижения надежности и состояния безопасности питьевой воды в системах водоснабжения, диффузионной теории. Создать гидравлические модели для установления среднего по живому сечению значения концентрации бактерий и давления воды вдоль водовода.

Диффузионное перемешивание жидкости

Для оценки состояния питьевой воды в системах питьевого водоснабжения, а также прогноза изменения ее качества возникает необходимость моделирования гидродинамических процессов проявляющихся в системах водоподдачи и водораспределения. При этом представляет наибольший интерес моделирование диффузионного перемешивания биологических субстанций в составе питьевой воды. Диффузионные процессы имеют практическое приложение во многих областях науки и техники. В случае, когда в объеме жидкости или газа существует частицы другого вещества, тогда в процессе движения будет происходить перенос вещества. Это происходит при неоднородности плотностей, давлений или температуры в выбранной области жидкости и газа. Перенос вещества в жидкости или газа называются диффузией. Способностью диффузии обладают мельчайшие частицы среды, а также более крупные частицы среды. Процесс диффузии в турбулентных потоках, а также в ламинарных потоках, подчиняется механизму конвективной диффузии частиц среды. Согласно основного закона Фика диффузионный поток n -ной компоненты смеси пропорционален градиенту концентрации этого компонента, взятом с обратным знаком. M_n масса ρ_n концентрация n -ой фазы смеси.

$$i_n = -\varepsilon_s \frac{\partial \rho_n}{\partial x} \text{ или } i_n = -\varepsilon_s \Delta c_n.$$

Выражение для установления количества массы переноса на единицу объема записываем, как:

$$M_n = -\varepsilon_s \frac{\partial \rho_n}{\partial x},$$

где i_n - интенсивность диффузионного потока, ε_s - коэффициент турбулентной диффузии, ρ_n - плотность массы.

Определение коэффициента диффузии. В случае идеальной диффузии формула Ричардсона Колмогорова

$$\varepsilon_s = 10,1 R_0 u^* \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}},$$

где u^* - динамическая скорость смеси, $u^* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}}$.

Динамическая скорость определяется с учетом потери напора:

$$u^* = \frac{\sqrt{\psi} V_0}{Re^{1-\frac{\varphi}{2}}} \left(\frac{\psi}{R_0}\right)^\gamma,$$

$$\varepsilon_s = 10,1 R_0 u^* = 10,1 R_0 \frac{\sqrt{\psi} V_0}{Re^{1-\frac{\varphi}{2}}} \left(\frac{\psi}{R_0}\right)^\gamma$$

теперь переводя в безразмерные величины имеем

$$\hat{\varepsilon}_s = \frac{\varepsilon_s}{R_0 V_0} = \frac{10,1 \sqrt{\psi}}{Re^{1-\frac{\varphi}{2}}} \left(\frac{\psi}{R_0}\right)^\gamma,$$

где ψ - постоянная Кармана, численное значение которой зависит от числа Рейнольдса.

Постоянная Кармана изменяется при переходе от одних точек к другим в пределах живого сечения; φ - показатель степени для средней скорости, значение которой зависит ($1 \leq \varphi \leq 2$) от режима движения потока воды.

Для турбулентного $\varphi = 2$, ламинарного режима движения $\varphi = 1$.

$\mu = \frac{\eta}{C R T}$ - динамическая вязкость жидкости, где C - const; η - энергия необходимая для скачка молекулы (энергия активизации молекулы).

$\gamma = 0$ показатель степени у расчетной высоты выступов шероховатости. Таким образом, имеем:

Для гладких труб $\hat{\varepsilon}_s = \frac{\sqrt{\psi}}{Re^{1-\frac{\psi}{2}}}$

Рейнольдсом установлено, что при ламинарном режиме $\varphi = 1$ и $\psi = 8$. Для ламинарной области течения напорных гладких трубах $\hat{\varepsilon}_s = \frac{\sqrt{\psi}}{Re}$, а для достаточно гладких труб $\varphi = 1,75$.

При турбулентном режиме в гладких трубах имеет место зависимость Блазиуса $\varphi = 1,75$ и $\psi = 0,0395$

$$\varepsilon_s = \frac{0,19874}{Re^{0,125}} \left(\frac{\psi}{R_0} \right)^{\gamma}$$

При движении дисперсной смеси (например, воды и примеси) в трубе при некотором выбранном объеме, если отсутствует фазовое превращение реакции, то массовая доля каждой фазы смеси, отнесенной к единице объема будет постоянной (хотя объем деформируется), так как в этот объем из вне примеси или вода не поступают и из нее не вытекают, тогда можно также написать: $\vec{t}_n = -\rho_n \varepsilon_n \text{grad} c_n$ [1].

Массовая доля n-ной фазы смеси в выбранной части объема определяется равенством $M_n = \int \rho_{ni} c_n d\tau$, где c_n , ρ_{ni} - объемная концентрация и масса n-ой фазы смеси.

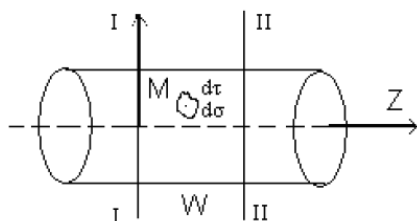


Рис. 1. Схема для вывода уравнения диффузии.

При наличии диффузионного потока справедливо равенство $\vec{t}_n = -\varepsilon_n \text{grad} c_n$, тогда изменения массовой доли в выбранном объеме определяются равенством

$$\frac{d}{dt} \left[\int \rho_{ni} c_n d\tau \right] = \int \vec{t}_n d\tau + \int \vec{q}_n d\tau,$$

где \vec{t}_n - интенсивность диффузионного потока, \vec{q}_n - интенсивность потока термодиффузии.

При непрерывности со своими производными функциями ρ_{ni} , c_n , \vec{V}_n , \vec{t}_n , \vec{q}_n уравнение

можно написать в дифференциальной форме:

$$\frac{\partial(\rho_{ni} c_n)}{\partial t} + \text{div}(\rho_{ni} c_n \vec{V}_n) = \text{div} \vec{t}_n + \text{div} \vec{q}_n,$$

где \vec{V}_n - вектор скорости n-ой фазы смеси.

При отсутствии диффузионного и термодиффузионного переноса массы $\vec{t}_n = 0$, $\vec{q}_n = 0$ имеем

$$\frac{\partial(\rho_{ni} c_n)}{\partial t} + \text{div}(\rho_{ni} c_n \vec{V}_n) = J_{nk},$$

где J_{nk} - масса, отнесенная к единице объема при фазовом превращении k-той фазы к n-ой. Здесь уместно равенство $J_{nk} = -J_{kn}$

Если отсутствует термодиффузионный перенос массы и фазовое превращение уравнения диффузии примет вид:

$$\frac{\partial(\rho_{ni} c_n)}{\partial t} + \text{div}(\rho_{ni} c_n \vec{V}_n) = \text{div} \vec{t}_n + q_n$$

В случае, когда масса перенос в потоке интенсивное, то происходит интенсивное изменение концентрации фаз частицы. При этом фаза смеси будет быстро перемещаться и поэтому в этом случае количество массового переноса будет большим, чем диффузионные и термодиффузионные переносы масс [4]. Тогда уравнение сохранения массы (называемые уравнением неразрывности) записывается в виде:

$$\frac{\partial(\rho_{ni} c_n)}{\partial t} + \text{div}(\rho_{ni} c_n \vec{V}_n) = J_n + q_n$$

Предполагая отсутствие химико-биологического переноса массы ($J_n = 0$) уравнение напишется в виде:

$$\frac{\partial(\rho_{ni} c_n)}{\partial t} + \text{div}(\rho_{ni} c_n \vec{V}_n) = q_n$$

В рассматриваемом уравнении неизвестными являются: c_n - концентрация биологической субстанции-бактерий, вектор скорости частиц $-V_n$, истинная плотность фаз - ρ_{ni} . Для определения неизвестных параметров применяется модель взаимопроникающих и взаимодействующих многофазных смесей:

$$\rho_n \frac{d\vec{V}_n}{dt} = -f_n \text{grad} p + f_n \mu_n \Delta \vec{V}_n + k(\vec{V}_p - \vec{V}_n) + \rho_n \vec{F}_n,$$

где $\rho_n = \rho_{ni} c_n$ - приведенная плотность n-ой фазы смеси.

На основе сжимаемости жидкости устанавливается зависимость давления от изменения концентрации: $P=P(c)$. В зависимости от цели исследования и объекта среды, т.е. дисперсной смеси рассматриваются различные модели.

Предположим, частицы фаз двигаются с постоянной скоростью $\vec{V}_n = \text{const}$, каждая фаза смеси несжимаемы, тогда уравнения упрощаются. Уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial c_n}{\partial t} + \text{div}(c_n \vec{V}_n) = q_n$$

при $\vec{V}_n = \text{const}$, $\frac{\partial c_n}{\partial t} = q_n$.

Предположим, что выравнивание концентрации происходит путем молекулярного переноса веществ в области водовода. Тогда происходит диффузионный процесс перемешивания и уравнение диффузионного перемешивания записывается:

$$\frac{\partial c_n}{\partial t} + \text{div} \vec{j} + \sigma c = \text{div} \vec{j},$$

где $\vec{j} = cV_r \vec{e}_r + cV_0 \vec{e}_0 - (cV_z + \varepsilon_s \frac{\partial c}{\partial z}) \vec{e}_z$, $\vec{i} = c \vec{V}_{kp} \vec{e}_z$.

Это уравнение является фундаментальным уравнением диффузионного движения смесей и описывает динамику изменения концентрации различных примесей в жидкости, когда параметры движения фаз смесей принимаются осредненными по живому сечению потока [5]. Перенос биологической субстанции (основа биологической субстанции составляют бактерии) в воздухе и в воде осуществляется движением потока воды (воздуха) с учетом их мелкомасштабных флуктуаций. Осредненный поток биологической субстанций, переносимых массами воды (воздуха), как правило, имеет адвективную и конвективную составляющие, а осредненные флуктуационные их движения можно интерпретировать как диффузию на фоне основного осредненного движения, связанного с ним. Уравнение диффузионного перемешивания может быть также обобщено, так, если в процессе распространения часть биологической субстанции входит в реакции с

внешней средой или распадается, то этот процесс интерпретируется, как поглощение субстанции, тогда правая часть уравнения равняется нулю [3]. Вместе с этим диффузионная теория может также учитывать динамику изменения биологических процессов, при этом важное значение имеет величина или характеристика химико-биологического превращения конкретного типа бактерий.

Следует отметить, что согласно принятым требованиям для оценки безопасности питьевого водоснабжения контролируется только обобщенное определение о бактериальном загрязнении воды - общее количество бактерий и коли-индекс, что практически исключает использование чисто биологических моделей для описания процесса движения бактерий в потоке воды. Поэтому, для описания процессов, где характерными являются общее количество бактерий, прибегают к гидравлическим моделям, где нет необходимости рассматривать дифференциации бактерий по их биологическим свойствам. В гидравлических исследованиях наибольшее распространение получения движения смеси: воды и взвешенных наносов, отдельные положения этих исследований также представляют интерес для рассмотрения движения смеси: воды и бактерий. Известно достаточно много исследований, посвященных проблемам трансформации и перемешиванию взвешенных твердых частиц в воде в процессе ее движения. Использование основных положений позволяет сделать вывод гидравлических уравнений для описания и управления процессами изменения осредненного значения концентраций бактерий по всему объему воды. Эти уравнения позволяют в достаточной степени описывать состояние безопасности централизованной системы питьевого водоснабжения городов [2].

Заключение

Таким образом на основе теории диффузионного перемешивания жидкости получены

гидравлические закономерности, описывающие изменения осредненного по живому сечению потока концентрации бактерий, изменения давления воды с учетом изменения гидравлического сопротивления на трения.

Литература

1. *Абрамов Н.Н., Поспелова М.М.* и др. Расчет водопроводных сетей. – М.: Стройиздат, 1983. – 278 с.
2. *Байбеков Р.Ф., Черников В., Соколов О.А.* Экологические основы качества воды и здоровье человека. – Пушкино, МСХА им. Тимирязева, 2004. – 11 с.
3. *Гловацкий О.Я., Исаков Х.Х., Талипов Ш.Г.* Опыт диагностирования насосных станций и скважинных насосов // Мелиорация и водное хозяйство. 2003. № 3. – С.45-47.
4. *Журба М.Г., Соколов Л.И., Говорова Ж.М.* Водоснабжение. Проектирование систем и сооружений. Системы распределения и подачи воды. – Изд-во АСВ, 2003. Т.3. – С. 620-1040.
5. Новые технологии и оборудование в водоснабжении и водоотведении. – Госстрой РФ, НИИ Коммунального водоснабжения и очистки воды. одкомунтех, 2001. Вып.3.
6. Требования к качеству воды нецентрализованного водоснабжения. Санитарная охрана источников. – М.: Наука, 2003. – 125 с.

References

1. *Abramov N.N., Pospelova M.M.* Raschet vodoprovodnyh setej [The calculation of water supply networks]. – Moscow: Strojizdat, 1983. – 278 p.
2. *Bajbekov R.F., Chernikov V., Sokolov O.A.* Jekologicheskie osnovy kachestva vody i zdorov'e cheloveka [Ecological bases of water quality and human health]. – Pushhino, MSHA im. Timirjazeva, 2004. – 11 p.
3. *Glovackij O.Ja., Isakov H.H., Talipov Sh.G.* Opyt diagnostirovaniya nasosnyh stancij i skvazhinnyh nasosov [Experience diagnosing pump stations and submersible pumps] // Melioracija i vodnoe hozjajstvo [Irrigation and Water Management]. 2003. № 3. – P.45-47.
4. *Zhurba M.G., Sokolov L.I., Govorova Zh.M.* Vodosnabzhenie. Proektirovanie sistem i sooruzhenij. Sistemy raspredelenija i podachi vody [Water supply. Designing of systems and structures. Distribution system and water supply]. – Izd-vo ASV, 2003. T.3. – P. 620-1040.
5. *Novye tehnologii i oborudovanie v vodosnabzhenii i vodootvedenii* [New technologies and equipment for water supply and sanitation]. – Gosstroj RF, NII Kommunal'nogo vodosnabzhenija i ochistki vody. Vodkommunteh, 2001. Issue.3.
6. *Trebovanija k kachestvu vody necentralizovannogo vodosnabzhenija.* Sanitarnaja ohrana istochnikov [Requirements for water quality centralized water supply. Sanitary protection of sources]. – Moscow: Nauka, 2003. – 125 p.

Статья поступила в редакцию 25 февраля 2015 г.

Погорелова Анастасия Сергеевна – студент кафедры «Техносферная безопасность» Муромского института (филиала) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых», г. Муром, Россия. E-mail: nasta94@mail.ru

Pogorelova Anastasia Sergeevna – Student, Murom Institute of Vladimir State University, Murom, Russia. E-mail: nasta94@mail.ru