

ПРОБЛЕМЫ ВОДОСНАБЖЕНИЯ И ВОДООТВЕДЕНИЯ

УДК 628.334.2.004.69

АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ КОМПЬЮТЕРНЫХ ПРОГРАММ ДЛЯ РАСЧЕТА ДВИЖЕНИЯ СТОКОВ В СЕТЯХ ВОДООТВЕДЕНИЯ

А.В. Калинин

Кафедра водоснабжения и водоотведения
Тольяттинский государственный университет
ул. Белорусская, 14, Тольятти, Россия, 445667

Использование математических зависимостей, полученных для естественных и искусственных водотоков, для расчета движения стоков в сетях водоотведения, не способствует получению достоверных результатов. Применение сложных компьютерных программ значительно увеличивает стоимость всего вычислительного комплекса. Замена сложных формул простыми степенными зависимостями при расчете концентрации загрязнений в сетях водоотведения может быть оправдана при условии тщательной проверки вводимых данных и их корректировки.

Ключевые слова: водоотведение, математические модели, концентрация загрязнений.

Процесс отведения поверхностного стока с урбанизированной территории можно условно разделить на четыре этапа:

- 1) выпадение атмосферных осадков на данной территории;
- 2) формирование стока на площади водосборного бассейна;
- 3) движение стока в сети водоотведения;
- 4) очистка стока и его сброс в водный объект.

Для расчета всего процесса необходимо знать закономерности формирования и движения стока и загрязнений на каждом этапе:

- 1) количество, интенсивность, вид и периодичность выпадающих на данной территории осадков;
- 2) особенности аккумуляции загрязнений на территории водосбора и формирования поверхностного стока;
- 3) гидродинамика движения стока и загрязнений, закономерности физико-химических процессов в водоотводящей сети;
- 4) особенности регулирования и очистки стока от загрязнений, сброса стока в водные объекты.

Математические модели, позволяющие решать инженерные задачи третьего этапа отведения поверхностного стока, очень распространены в водоотведении, так как многие из них основываются на классических моделях, применяемых для расчета движения наносов в естественных и искусственных руслах. Однако полученный в течение последних 40 лет практический опыт эксплуатации систем водоотведения наглядно показал, что прямой перенос математических зависимостей, полученных для естественных и искусственных водотоков, на движение стоков в сетях водоотведения не гарантирует получение удовлетворительного результата. Это связано с тем, что поверхностный сток с урбанизированной территории перемещает сравнительно мелкие частицы, которые могут изменять свои физико-химические свойства за время движения в сети. Свойства загрязнений также могут быстро меняться за очень короткий период в результате изменения вида экономической деятельности на данной территории. Физико-химические и гидравлические параметры стока зависят от того, в какой период происходит движение стока в трубах — во время интенсивного выпадения осадков или в засушливый период. На гидродинамические параметры потока в значительной мере влияет вид и конфигурация системы водоотведения, коллекторов и труб. Сама система может быстро меняться в течение короткого отрезка времени в результате деятельности человека на данной территории.

Для определения гидравлических характеристик потоков и решения прикладных задач неустановившегося течения жидкости в открытых руслах давно применяются одномерные и двумерные математические модели, основанные на уравнениях Сен-Венана. Для решения этих уравнений используются различные методы, на основе которых разработаны компьютерные программы и получены решения для естественных водных объектов [1—4]. К уравнениям Сен-Венана обычно добавляются уравнения распределения твердых частиц по глубине потока и уравнение расхода наносов, например Энгелунда—Хансена [5; 6]:

$$C_s = 0,05 \left(\frac{K^2 R_\Gamma^{1/3}}{g} \right) \theta^{5/2} \sqrt{(s-1)gd^3}, \quad (1)$$

где C_s — концентрация загрязнений; $K = \left(\frac{C}{R_\Gamma} \right)$ — коэффициент Стриклера; $C = \frac{v}{\sqrt{R_\Gamma i_0}}$ — коэффициент Шези; v — средняя скорость потока; R_Γ — гидравлический радиус; i_0 — уклон дна; s — относительная плотность частиц $s = \rho_s / \rho$; ρ_s — средняя плотность частиц; ρ — плотность воды, d — средний диаметр частиц.

В компьютерных программах, моделирующих движение стоков в сетях водоотведения, также применяются уравнения Сен-Венана, и для их замыкания часто используются те же полуэмпирические формулы. Например, приведенная выше формула Энгелунда—Хансена использовалась в компьютерной программе MOUSE TRAP. На данный момент существует более 200 подобных формул, что указывает на отсутствие пока еще основополагающей теории в данной области. Формулы получены на основе экспериментальных исследований в конкретных условиях и отражают особенности транспорта наносов именно в этих условиях.

Также часто при гидродинамическом расчете сетей водоотведения применяется известное уравнение Мейера-Петера и Мюллера, в основе которого лежит параметр Шилдса (Storm Water Management Model) [7; 8]:

$$C_s = 8(\beta\theta - 0,047)^{1,5} \sqrt{(s-1)gd^3}, \quad (2)$$

где $\beta = \left(\frac{0,06}{\theta} + 0,41\theta \right)^{15/16}$, $\theta = \frac{\tau}{g(\rho_s - \rho)d}$ — параметр Шилдса; τ — напряжение трения на дне трубы.

При применении аналогичной программы при расчете концентрации загрязнений в больших коллекторах Марселя, где наблюдаются отложения минеральных крупнодисперсных примесей диаметром более 1 мм, был получен вполне удовлетворительный результат [9].

В программах FLUPOL, HYPOCRAS, HORUS применяется уравнение М.А. Великанова [7]:

$$C_s = \eta \frac{\rho_s v}{(s-1)w_0} i, \quad (3)$$

где η — эмпирический коэффициент; w_0 — гидравлическая крупность частицы; i — уклон свободной поверхности.

В разных программах предлагается различное значение коэффициента η в зависимости от результатов экспериментальных исследований. Программы, использующие формулу М.А. Великанова или подобные ей, так называемые энергетические формулы, получили большое распространение благодаря простоте расчета. Приведем в качестве примера формулу М.И. Алексева и А.М. Курганова [10]:

$$\rho_T = 0,029(v/w_0)^{2,25} \sqrt{i_0}, \quad (4)$$

где ρ_T — транспортирующая способность потока (кг/м³).

В компьютерных программах MOSQUITO, HYDROWORKS, MOUSE, INFOWORKS, SPIDA используются формулы Аккерса—Уайта [11]:

$$C_s = \rho_s J_a \left(\frac{W_e R_\Gamma}{A} \right)^a \left(\frac{d}{R_\Gamma} \right)^\beta \lambda_c^\gamma \left\{ \frac{v}{\sqrt{g(s-1)R_\Gamma}} - K \lambda_c^\delta \left(\frac{d}{R_\Gamma} \right)^\varepsilon \right\}^m, \quad (5)$$

$$K = 11,3^{(1-n)} g^{n/2} A_{gr},$$

$$A_{gr} = \frac{0,23}{\sqrt{D_{gr}}} + 0,14,$$

$$D_{gr} = d \left[\frac{g(s-1)}{v^2} \right]^{1/3},$$

где W_e — эффективная ширина дна; A — площадь сечения потока; λ_c — гидравлический коэффициент трения; v — кинематический коэффициент вязкости; $J_a, \alpha, \beta, \gamma, \delta, \varepsilon, m, n$ — коэффициенты Аккерса—Уайта.

Коэффициенты Аккерса—Уайта определяются по эмпирическим формулам и в основном зависят от гранулометрического состава и физических характеристик загрязнений. Модель, как считают разработчики программ, позволяет определить концентрацию загрязнений в стоках независимо от способа перемещения частиц в потоке, учесть процесс осаждения и самоуплотнения осадка на дне трубы в период отсутствия дождей, эрозию слоя отложений и взвешивание частиц во время прохождения максимальных расходов.

Вместе с тем использование в математических моделях сложных формул, детально описывающих механизм транспорта загрязнений в водоотводящих сетях, не приводит к улучшению качества компьютерной программы. Это связано с необходимостью ввода множества данных, которые зачастую невозможно точно измерить, а время расчета этих сложных зависимостей значительно увеличивает время работы компьютера и стоимость самой компьютерной программы [12]. Исходя из этих соображений, разработчики программы CANOE предлагают использовать максимально упрощенную формулу

$$C_s = \frac{\alpha}{w_0} v^\beta, \quad (6)$$

где α и β — коэффициенты, определяемые пользователем программы самостоятельно при тарировке модели.

Для того, чтобы проверить, насколько приемлем подход, предложенный разработчиками программы CANOE, нами были построены кривые зависимости концентрации твердых частиц от средней скорости, рассчитанные по формулам (1), (2), (3), (4) (рис. 1).

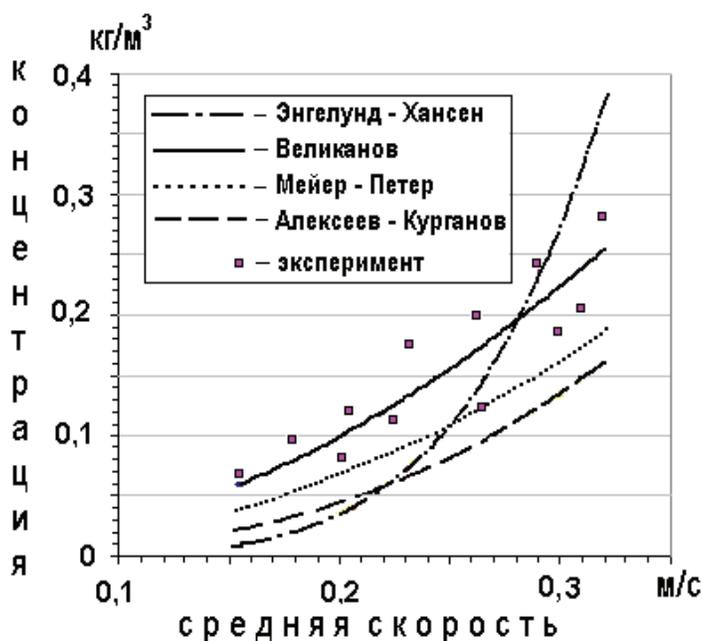


Рис. 1. Кривые зависимости концентрации твердых частиц от средней скорости потока

Для построения кривых были использованы данные экспериментальных исследований на физической модели двухфазного потока в лаборатории кафедры гидравлики и гидротехнических сооружений Российского университета дружбы народов [13]. Параметры физической модели приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры физической модели

Средняя скорость v , м/с	Глубина потока h , м	Ширина русла b , м	Уклон дна i_0	Число Рейнольдса	Концентрация песка C_s , г/л	Размер зерен песка d , мм	Плотность ρ , кг/м ³
0,155—0,31	0,038—0,08	0,25; 1,4	0,001—0,0022	5 890—24 180	0,06—0,28	0,35	2 650

Для условий транспорта потоком воды частиц песка, смоделированных на физической модели, лучшие результаты получены для расчета по формуле Великанова при коэффициенте $\eta = 0,009$.

Полученные расчетом степенные зависимости были приведены к виду, используемому в программе CANOE (табл. 2).

Таблица 2

Формулы, приведенные к простым степенным зависимостям

Формула Великанова ($\eta = 0,009$)	Формула Алексева—Курганова	Формула Мейера—Петера и Мюллера	Формула Энгелунда—Хансена
$C_s = \frac{0,107}{w_0} v^{2,1}$	$C_s = \frac{0,149}{w_0} v^{2,8}$	$C_s = \frac{0,065}{w_0} v^2$	$C_s = \frac{4,37}{w_0} v^5$

Мы сделали вывод, что многие формулы, применяемые в математических моделях для расчета концентрации загрязнений, транспортируемых потоком в сетях водоотведения, можно заменить простыми степенными функциями, как это сделано в программе CANOE. Вместе с тем использование такого подхода в математическом моделировании требует тщательной проверки вводимых данных и их постоянной корректировки в процессе применения модели в конкретных условиях.

Ряд исследователей отказались от использования эмпирических формул и применили численные методы для решения уравнения Сен-Венана, что позволило им получить вполне удовлетворительные результаты при моделировании процесса отложения загрязнений в резервуарах больших размеров [14; 15].

В последнее время увеличилось количество математических моделей, использующих известные уравнения Навье—Стокса, которые являются нелинейными уравнениями и до настоящего времени не имеют точного математического решения. Основная проблема заключается в том, что пока не существует полной математической модели турбулентного движения, которая, как известно, является основным фактором, влияющим на процесс отрыва твердых частиц от дна трубы и их движения во взвешенном состоянии [16].

Вместе с тем в связи с увеличением мощности компьютеров делаются попытки построения математических моделей путем непосредственного решения этих уравнений. Такое численное моделирование называется прямым (direct numerical

simulation — DNS). Трудоемкость расчета этого метода связана с хаотичным движением твердых частиц, как во времени, так и в пространстве, что требует разбивки численного пространства и времени на множество ячеек по выбранной численной схеме. Выбранные интервалы пространства и времени должны соответствовать условиям численной стабильности и устойчивости модели, чтобы избежать погрешности, возникающие при увеличении расчетного времени [17]. Обычно областью применения прямого численного моделирования являются течения с простой геометрией при небольших числах Рейнольдса [18]. Применение метода DNS для расчета движения минеральных примесей в системах водоотведения пока мало используется, так как даже при использовании мощных компьютеров расчеты требуют много времени. Это связано со сложным характером взаимодействия турбулентных структур с находящимися в потоке твердыми частицами, которые, в свою очередь, влияют на изменение параметров этих структур, в том числе и на процесс их зарождения и диссипации [19]. Подсчитано, что для того, чтобы смоделировать движение каждой частицы размером 0,1 мм по методу DNS в ограниченном потоке жидкости размером $5 \times 0,5 \times 0,4$ м с концентрацией частиц 0,1 мг/л, необходимо рассчитать 100 миллионов траекторий [20].

Другой подход к моделированию процесса перемещения твердых частиц потоком жидкости с использованием уравнений Навье—Стокса применили Жанг и Шафлингер [21; 22], которые предложили модель движения двухфазной слоистой жидкости. В этой модели граница между чистой жидкостью и взвесью частиц постоянно изменяется из-за конвективного перемешивания жидкой и твердой фракций. Частота, с которой происходит изменение границы между жидкостью и взвесью, зависит от числа Рейнольдса. Недостатком предложенной модели является то, что не принимается во внимание взаимодействие между самими твердыми частицами и перемещение частиц вдоль стабильной твердой границы.

В методе гидродинамической неустойчивости поток чистой жидкости воздействует на поверхность зернистой твердой среды, над которой он движется [23—25]. В соответствии с этим методом любая поверхность, состоящая из отдельных не связанных между собой частиц, изначально имеет некоторую кривизну и может изменять свои очертания под воздействием движущегося потока по синусоидальному закону. Возникновение рядовых форм связано с изменением равновесия между осаждающимися частицами и частицами, отрывающимися от дна.

Более распространенными являются численные методы с использованием уравнений Рейнольдса (RANS), которые, по сути, являются модификацией уравнений Навье—Стокса с введением в них напряжений Рейнольдса и турбулентных пульсаций. Система уравнений Рейнольдса содержит шесть неизвестных и не замкнута, поэтому для ее решения применяют различные методы: вводится понятие турбулентной вязкости (модель Буссинеска), пути перемешивания (модель Прандтля), диссипации турбулентной кинетической энергии ($k - \varepsilon$ модель); скорости диссипации энергии турбулентности ($k - \omega$ модель) и другие. В этих моделях используются данные, полученные статистическими методами, и вводятся различные допущения.

Численное моделирование с применением метода крупных вихрей (Large eddy simulation, LES) занимает промежуточное положение между моделями, использу-

ющими уравнения Рейнольдса и DNS. Они позволяют сделать расчет больших вихревых структур на основе моделирования структур небольших размеров.

Все вышеперечисленные математические модели реализованы в пакетах коммерческих компьютерных программ для расчета гидродинамических течений: STAR-CD, Fluent, CFX, FlowVision и других. Пользователю этих пакетов программ предоставляется возможность самостоятельно выбрать разностные схемы и алгоритмы, а также их параметры. Пакеты обеспечивают широкий спектр приложений для решения прикладных задач, в том числе и в области водоотведения: расчет напряжений трения в определенных сечениях водоотводящего коллектора (CFX) [26]; численное моделирование осаждения загрязнений в регулирующих резервуарах и отстойниках, определение параметров стоков на выпусках коллекторов (Fluent) [20; 27]; расчет концентрации суспензии в трубе (FlowVision) [28]; распространение загрязнений в речном потоке (STAR-CD) [29].

Использование сложных компьютерных программ при расчете концентрации загрязнений в водоотводящих сетях, по-видимому, оправдано сложным характером самого явления (неустановившийся гидравлический режим движения двухфазного потока в геометрически изменяющемся русле, непостоянство физико-механических характеристик твердой фазы стока). Вместе с тем, всегда необходимо учитывать то обстоятельство, что процесс получения адекватных решений для задач различного класса при использовании этих программ может существенно различаться.

Движение загрязнений в сети водоотведения связано с особенностями выпадения атмосферных осадков на данной территории и формирования поверхностного стока на площади водосборного бассейна, поэтому не может быть получен общий верный результат, если не будут применены адекватные математические модели этих процессов. При этом используемые в пакете подпрограммы, представляющие математическую модель отдельного гидрологического или гидравлического явления, происходящего в сети водоотведения, должны полностью соответствовать одна другой. Например, если математическая модель гидродинамики сети требует, чтобы в качестве исходных данных на входе были представлены данные об уровне воды в ее ответвлениях, то математические модели, описывающие гидравлику отдельных сооружений регулирования стока должны предоставлять эти данные. Ошибка в 10%, допущенная при определении площади непроницаемой поверхности, приводит к ошибке от 15 до 30% при определении максимального расхода на выпуске, в зависимости от того, какая была выбрана модель формирования дождевого стока. Отсюда вытекает необходимость выбора программ, способных минимизировать возможные ошибки, возникающие при введении исходных данных. Нет смысла использовать сложные математические модели для описания отдельных процессов, если это не приведет к значительному улучшению качества моделирования работы всей системы. Использование сложных математических моделей всегда приводит к увеличению времени вычислений, требует более тщательного подхода к процессу калибровки программы, увеличения количества вводимых данных и повышения их точности. Последнее требование часто становится определяющим при выборе компьютерной программы, так как основная проблема, с которой сталкиваются пользователи сложных ком-

пьютерных программ, заключается в необходимости введения множества исходных данных, которые зачастую не поддаются точному измерению. Суммарная ошибка в измерении интенсивности атмосферных осадков, расхода поверхностного стока в сети, концентрации загрязнений на площади водосбора даже при условии применения современных измерительных приборов может составлять порядка 35% [30]. Использование точных, но дорогостоящих измерительных систем значительно увеличивает стоимость всего вычислительного комплекса. Стоимость его дальнейшей эксплуатации также зависит от того, насколько часто требуется его поверка и калибровка, насколько высоки требования к обслуживающему персоналу.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Васильев О.Ф., Воеводин А.Ф., Атавин А.А.* Методы расчета неустановившихся течений в системах открытых русел и каналов // Численные методы механики сплошной среды. — Т. 6. — № 4. — М., 1975.
- [2] *Лятхер В.М., Прудовский А.М.* Гидравлическое моделирование. — М.: Энергоатомиздат, 1984.
- [3] *Милитеев А.Н., Петров П.Г., Беликов В.В.* Пакет прикладных программ для расчета течений жидкости в открытых потоках (КАСКАД) // Динамика и термика рек, водохранилищ и окраинных морей. Т. 2. — М., 1989.
- [4] *Грачев Н.Р.* Об использовании методов математического моделирования русловых потоков в практике проектирования на водных путях // Труды академии водохозяйственных наук. Водные пути и русловые процессы. Вып. 3. — М., 1996.
- [5] *Масликова О.Я.* Математическое моделирование деформаций дна в покрытых льдом нестационарных потоках: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. — М.: МГУП, 2008.
- [6] *Engelund F., Hansen E.* A Monograph on Sediment Transport in Alluvial Streams. 3ième edition. — Copenhagen, Danemark: Techn. Univers. of Denmark, 1967.
- [7] *Tassin B., Deutsch J.C.* Cours de Hydrologie urbaine. — Paris: ENPC, 2003.
- [8] *Meyer-Peter E., Muller R.* Formulas for bed-load transport // In 2nd meeting international association. — London, 1948.
- [9] *Lin H.* Le transport solide en collecteur unitaire d'assainissement et sa modélisation. Thèse de doctorat. — Paris: ENPC, 1993.
- [10] *Алексеев М.И., Курганов А.М.* Организация отведения поверхностного (дождевого и талого) стока с урбанизированных территорий. — М.: АСВ; СПбГАСУ, 2000.
- [11] *Ackers P.* Sediment aspects of drainage and outfall design // Proceedings of the international symposium on environmental hydraulics. — Hong kong, 1991.
- [12] *Chocat B.* // EURYDICE 92. Encyclopédie de l'hydrologie urbaine et de l'assainissement. — Paris: Tec&Doc, 1997.
- [13] *Калинин А.В.* Влияние русловой выемки на гидравлический режим реки: Дисс. ... канд. техн. наук. — М.: Изд-во РУДН, 1987.
- [14] *Torres A., Lipeme Kouyi G., Bertrand-Krajewski J.-L., Paquier A.* Modélisation 2D de l'hydrodynamique dans un bassin de retenue d'eau pluviale // Actes des 25èmes Rencontres Universitaires de Génie Civil. — Bordeaux, France: AUGC, 23—25 mai 2007.
- [15] *Ахметов В.К.* Численное моделирование двухфазного вихревого течения в гидротехническом отстойнике // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. — № 6. — М., 2008.
- [16] *Ouriemi M.* Erosion, transport et instabilités d'un lit de particules dans un tube. Thèse de doctorat. — Marseille: L 'Université de Provence, 2008.
- [17] *Dubois T., Jauberteau F., Temam R.* Dynamic multilevel methods and the numerical simulation of turbulence. — Cambridge: Cambridge University Press, 1999.

- [18] *Moreau M.* Modélisation numérique directe et des grandes échelles des écoulements turbulents gaz-particules dans le formalisme eulérien mésoscopique. Thèse de docteur. — Toulouse: L'Institut national polytechnique, 2006.
- [19] *Tanaka T., Eaton J.K.* Classification of Turbulence Modification by Dispersed Spheres Using a Novel Dimensionless Number // *Phys. Rev. Lett.* 101, 114502. 2008.
- [20] *Jaafar W.* Étude des champs de vitesse dans effluants des réseaux d'assainissement : Expérimentation et simulation numérique. Thèse de docteur. — Strasbourg: l'Université Louis Pasteur — Strasbourg 1, 2006.
- [21] *Zhang K., Acrivos A., Schaflinger U.* Stability in a two-dimensional hagen-poiseuille resuspension flow // *International Journal of multiphase Flow*, 18. 1992.
- [22] *Schaflinger, U.* Interfacial instabilities in a stratified flow of two superposed fluids // *Fluid Dynamics Research*, 13. 1994.
- [23] *Charru F., Mulleron-Arnold H., Eiff O.* Erosion and deposition of particles on a bed sheared by a viscous flow // *Journal of Fluid Mechanics*, 519. 2004.
- [24] *Lagrée P. Y.* A triple deck model of ripple formation and evolution // *Physics of Fluids*, 15 (8). 2003.
- [25] *Franklin E.M., Charru F.* Migration de dunes dans une conduite fermée // 18 ème Congrès Français de Mécanique, 27—31 août 2007. — Grenoble: 2007.
- [26] *Bonakdari H., Larrarte F.,* Experimental and numerical study of the shear stress in narrow compound channel // *Int. Conference on turbulence and interaction.* — Porquerolles, France: 2006.
- [27] *Dufresne M.* La modélisation 3D du transport solide dans les bassins en assainissement: du pilote expérimental à l'ouvrage réel. Thèse de doctorat. — Strasbourg: l'Université Louis Pasteur — Strasbourg 1. 2008.
- [28] *Гоглачев С.Н.* Конструирование и расчет основных эксплуатационных параметров устройства для очистки прудов — отстойников НПЗ: Дисс. ... канд. техн. наук. — Уфа: УГНТУ, 2008.
- [29] *Лунатов И.В.* Моделирование экологических проблем речных водоемов с использованием пакета STARCD // САПР и графика, № 12. 2000.
- [30] *Zug M., Vazquez J.* Modélisation des réseaux d'assainissement: Concepts-Approches et Etapes. Cours de 3ème année. — Strasbourg, France: ENGEES. 2004.

ANALYSIS OF THE USAGE OF COMPUTER PROGRAMS FOR WASTE MOTION ANALYSIS IN DRAINAGE NETWORKS

A.V. Kalinin

Togliatti State University
Belarusian str., 14, Togliatti, Russia, 445667

Usage of mathematical correlations, obtained for natural and artificial watercourses, to analyse the water motion in drainage networks don't give reliable results. The usage of complex computer programs greatly increases the cost of the entire computing system. Replacement of complex formulas with simple in the calculation of the concentration of pollutants in drainage networks can be justified, provided a thorough data validation and correction.

Key words: water drainage, mathematical models, concentration of pollutants.