

ОЦЕНКА ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛИЭТИЛЕНОВЫХ ТРУБ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ НАТУРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

*Е.В. Семененко, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины
Н.А. Никифорова, Национальная металлургическая академия Украины
Л.Г. Татарко, Украинский государственный химико-технологический университет*

Предлагается метод определения констант в зависимости коэффициента гидравлического сопротивления трения от числа Рейнольдса при напорном течении воды по полиэтиленовым трубам на основе экспериментов с безнапорным течением воды. Это позволит определять в полевых условиях коэффициент пропорциональности и показатель степени в указанной зависимости для выбранного типа труб конкретного производителя и повысить точность гидравлических расчетов.

Начало XXI века характеризуется двумя тенденциями при модернизации технологий добычи и переработки минерального сырья – повышением качества товарных концентратов и снижением энергоемкости [1 – 6]. Если задача повышения качества является актуальной для обогатительного производства, то для гидротранспортных установок и комплексов наиболее актуальной является задача снижения энергоемкости и удельного водопотребления. Некоторые авторы исследовали возможные методы модернизации гидротранспортных систем в этом направлении [1 – 8], что позволяет выделить три наиболее перспективных варианта: переход к гидротранспорту пульпы с концентрацией пасты, использование добавок поверхностно или гидродинамически активных веществ, полная или частичная замена стальных труб полимерными.

Переход к гидротранспорту пульпы с концентрацией пасты является самым радикальным вариантом, поскольку предполагает оборудование дополнительных мощностей для сгущения гидросмеси, отказ от старых насосов центробежного типа, переоборудование насосных станций под поршневые насосы, прокладку магистралей из труб меньшего диаметра. По причине значительных капитальных затрат этот вариант обычно реализуют при строительстве новых горно-обогатительных комбинатов.

Поверхностно или гидродинамически активные вещества широко используются для осветления оборотной воды или же для предварительного сгущения отходов обогащения. Гидродинамическая активность веществ проявляется в снижении гидравлического сопротивления при турбулентном течении воды или гидросмеси, что позволяет уменьшить энергоемкость процесса гидротранспортирования твердого материала. Гидродинамически активными являются водорастворимые полимеры, состоящие из линейных молекул, способных вытягиваться в длинные нити. Эффект снижения гидравлического сопротивления обусловлен деформацией молекулярных клубков полимеров под действием продольного гидродинамического поля, в результате которой клубки разворачиваются, и длинные линейные молекулы вытягиваются в направлении потока. Кроме того, при прохождении раствора полимера через центробежный насос снижается потребляемая мощность насоса, и увеличиваются его напор и КПД. Наиболее изучена гидродинамическая активность полиэтиленоксида и полиакриламида, которые являются карбоцепными полимерами состава соответственно $[-CH_2-CH_2-O-]_n$ и $[-CH_2-CH(CONH_2)-]_n$. Применение гидродинамически активных веществ в технологиях сгущения и осветления основано на их способности флокулировать тонкие частицы, связывая их в хлопья. Однако остаточная концентрация флокулянта, попавшего в систему гидротранспорта, может оказаться достаточной для снижения гидравлического сопротивления магистральной. Если она недостаточна, гидродинамически активное вещество можно добавлять на разных стадиях процесса. Считается, что этот вариант можно эффективно применять при сгущении пульп до средних концентраций без существенного переоборудования гидротранспортных установок. Однако, такая модернизация предполагает капитальные затраты на оборудование модуля для сгущения пульп и соответствующего хозяйства для подготовки ре-

агентов. Кроме того, при гидротранспорте многокомпонентных материалов следует заранее установить, тонкие частицы каких компонентов подвергаются флокуляции данным гидродинамически активным веществом, как это сказывается на гранулометрическом составе материала в гидросмеси, и каким при этом является соотношение между начальной и остаточной концентрацией гидродинамически активного вещества.

Таким образом, наименее затратным вариантом при модернизации существующих гидротранспортных установок технологий переработки минерального сырья является полная или частичная замена стальных труб полимерными. Однако широкое использование полимерных труб в промышленности страны сдерживается тем, что производители полиэтиленовых труб не контролируют свойства внутренней поверхности производимых изделий, а рекомендованные расчетные формулы не являются универсальными. Для гидравлических расчетов полимерных труб рекомендуют степенную зависимость коэффициента гидравлического трения от числа Рейнольдса, коэффициенты которой являются эмпирическими константами [9, 10],

$$\lambda = \frac{m}{\text{Re}^n}, \quad (1)$$

где λ – коэффициент гидравлического трения; Re – число Рейнольдса; m , n – эмпирические коэффициенты.

Значения эмпирических коэффициентов у разных авторов отличаются, при этом $0,226 \leq m \leq 0,25$ и $0,271 \leq n \leq 0,316$ [9, 10]. Эта разница, незначительная на первый взгляд, при большой длине магистрали приводит к существенным погрешностям при определении рабочей точки системы. Это особенно нежелательно для гидротранспортных комплексов, поскольку возникает опасность заштыбовки трубопроводов. Можно предположить две причины различия коэффициентов в формуле (1): во-первых, разные условия экспериментов и во-вторых, различия в свойствах труб конкретного производителя, в частности, шероховатости внутренней поверхности. Ни один из известных авторов не указывает условия проведения экспериментов, а уровень авторитетности некоторых из них предполагает использование результатов в автоматическом режиме. Информация, предоставляемая производителями труб, не вызывает доверия, поскольку диаграммы для гидравлического расчета, приводимые разными производителями, одинаковы и ориентированы на применение формулы Кольбука-Уайта. На доминирующую роль второй причины указывает обстоятельное исследование ВНИИМП [11], в котором указано, что свойства внутренней поверхности полиэтиленовых труб разных производителей различны, нестабильны и индивидуальны, поскольку определяются технологическими факторами и характеристиками используемого оборудования.

Решением этой проблемы может быть сертификация труб на основе их гидравлических испытаний, однако такой единый государственный орган отсутствует, а сами производители в этом не заинтересованы. Единственным выходом для проектировщиков в данном случае является проведение проектных расчетов по усредненным значениям коэффициентов формулы (1) с последующим уточнением их величин на основе гидравлических экспериментов после закупки труб.

Целью работы является разработка метода определения констант в зависимости коэффициента гидравлического сопротивления трения от числа Рейнольдса при напорном течении воды по полиэтиленовым трубам, основанного на натуральных экспериментах и обеспечивающего достоверную оценку коэффициента пропорциональности и показателя степени в указанной зависимости для выбранного типа труб конкретного производителя.

Обычно поставка труб для оборудования магистрали осуществляется при уже подготовленной местности, при действующих службах энергетика, механика и маркшейдера. В этом случае не составляет труда оборудовать опытную магистраль из нескольких секций труб на естественном уклоне или временный стенд с одной секцией трубы, но с возможностью менять угол наклона трубы к горизонту (рис. 1).

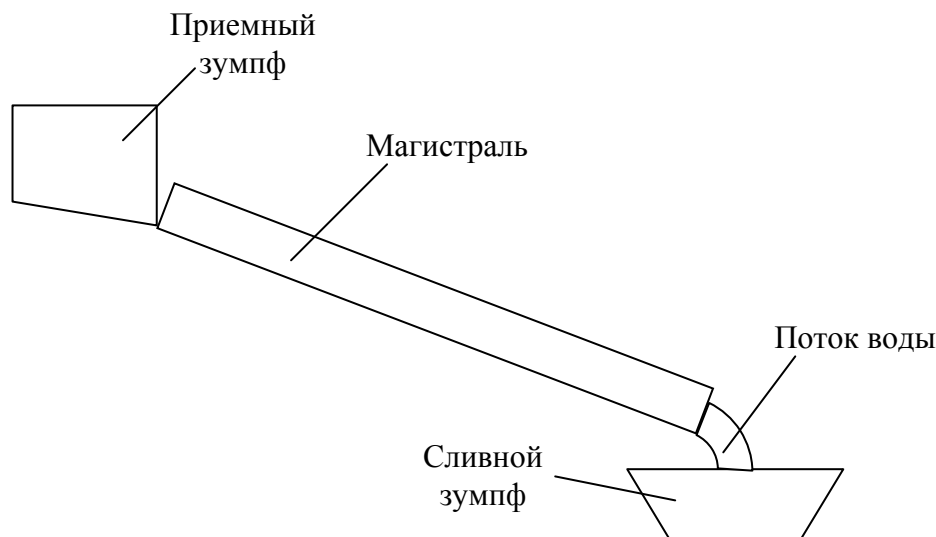


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментального стенда

С учетом того, что диаметры магистральных трубопроводов обычно превышают 0,4 м, а стандартная длина секции полиэтиленовых труб составляет 10 м, при таких испытаниях нужно ориентироваться на безнапорное течение, что позволяет экспериментально получить зависимость коэффициента гидравлического трения от числа Рейнольдса с использованием следующих формул:

$$\lambda = 8i \frac{g\omega^3}{Q^2 \chi}, \quad \text{Re} = \frac{4Q}{\nu\chi}, \quad (2)$$

где i – геодезический уклон; Q – объемный расход; χ – гидравлический радиус потока; ω – площадь живого сечения; ν – кинематический коэффициент вязкости жидкости.

Полученную экспериментальную зависимость (2) можно аппроксимировать функцией (1) и уточнить значение коэффициентов m , n . Эту зависимость можно также аппроксимировать логарифмической функцией и получить значения для соответствующего закона в соответствии с рекомендациями ИГМ НАН Украины [6, 12 – 14]

$$\lambda = \frac{a}{\lg^2(b \text{Re})}, \quad (3)$$

где a , b – эмпирические константы, зависящие от шероховатости и материала трубопровода.

При рассматриваемом типе безнапорного течения в круглой трубе величины χ и ω будут определяться высотой потока в диаметральном сечении [15], которая, собственно говоря, и будет фиксироваться в ходе экспериментальных исследований. Зависимость этих величин от высоты слоя воды в трубе может быть описана следующими зависимостями:

$$\chi = R\theta(\eta), \quad \omega = R^2\sigma(\eta), \quad \eta = \frac{h}{R}, \quad (4)$$

$$\theta(\eta) = \begin{cases} \arccos[2(1-\eta)^2 - 1] & \eta \leq 1 \\ 2\pi - \arccos[2(\eta-1)^2 - 1] & \eta > 1 \end{cases}$$

$$\sigma(\eta) = \begin{cases} \arccos[2(1-\eta)^2 - 1] - \sqrt{\eta}(1-\eta)\sqrt{2-\eta}, & \eta \leq 1 \\ 2\pi - \arccos[2(\eta-1)^2 - 1] + \sqrt{\eta}(\eta-1)\sqrt{2-\eta}, & \eta > 1 \end{cases}$$

где η – относительная глубина потока; $\theta(\eta)$, $\sigma(\eta)$ – безразмерные функции.

С учетом зависимостей (4) формулы (2) можно переписать в следующем виде:

$$\lambda = \frac{8igR^5}{Q^2} z(\eta), \quad \text{Re} = \frac{4Q}{\nu R} y(\eta), \quad z(\eta) = \frac{\sigma^3}{\theta}, \quad y(\eta) = \frac{1}{\theta}, \quad (5)$$

где $z(\eta)$, $y(\eta)$ – безразмерные функции.

Как показывают результаты расчетов во всем интервале изменения η , безразмерные функции $z(\eta)$ и $y(\eta)$ (рис. 2, 3) с инженерной точностью могут быть аппроксимированы следующими зависимостями:

$$z(\eta) = 0,8487 - 6,237\eta + 18,305\eta^2 - 2,7788\eta^3, \quad y(\eta) = \frac{0,3048}{\eta^{0,5886}}.$$

Для соответствия величин λ при напорном и безнапорном течениях требуется соблюсти равенство чисел Рейнольдса. Таким образом, если известен диапазон чисел Рейнольдса, для которого необходимо оценить константы в рассматриваемой зависимости при напорном течении воды, то безнапорное течение в трубе должно происходить при числах Рейнольдса из следующего интервала:

$$\text{Re}' \leq \text{Re}^* y(\eta) \leq \text{Re}'', \quad (6)$$

$$\text{Re}^* = \frac{4Q}{\nu R}, \quad \text{Re}' = \frac{2Q'}{\pi R \nu}, \quad \text{Re}'' = \frac{2Q''}{\pi R \nu},$$

где Q' , Q'' – интервал изменения расхода воды для напорного течения.

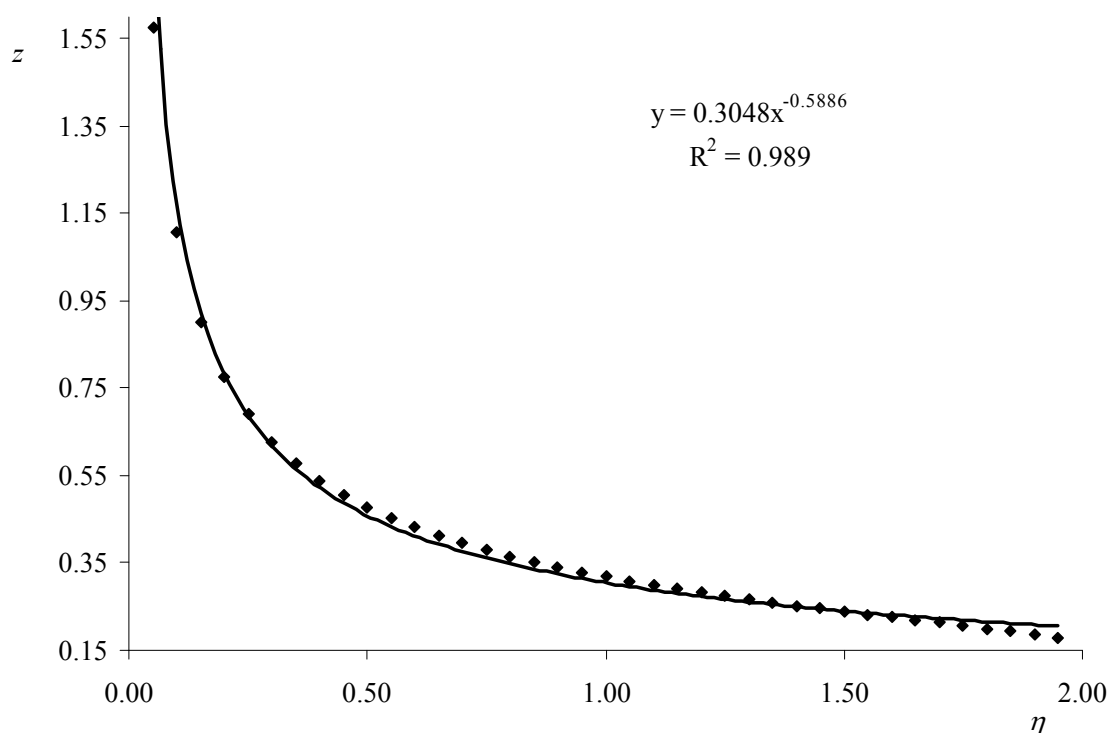


Рис. 2. Зависимость безразмерной функции $z(\eta)$ от относительной глубины потока

С учетом полученных выше формул двойное неравенство (6) преобразуется в соответствующее условие относительно расхода безнапорного потока

$$q(\eta)Q' \leq Q \leq q(\eta)Q'', \quad q(\eta) = 0,547\eta^{0,5886}.$$

Анализ значений функции $q(\eta)$ в интервале изменения относительной глубины потока $0 \leq \eta \leq 2$ (рис. 4), показывает, что величины расходов Q и Q' , Q'' являются приемлемыми.

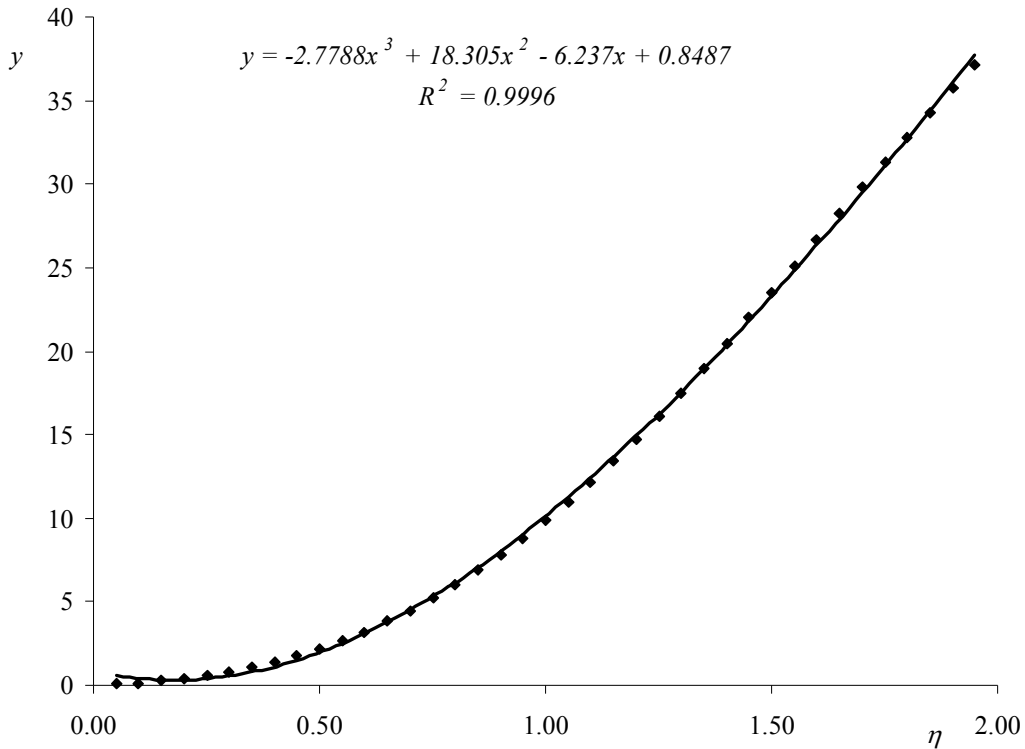


Рис. 3. Зависимость безразмерной функции $y(\eta)$ от относительной глубины потока

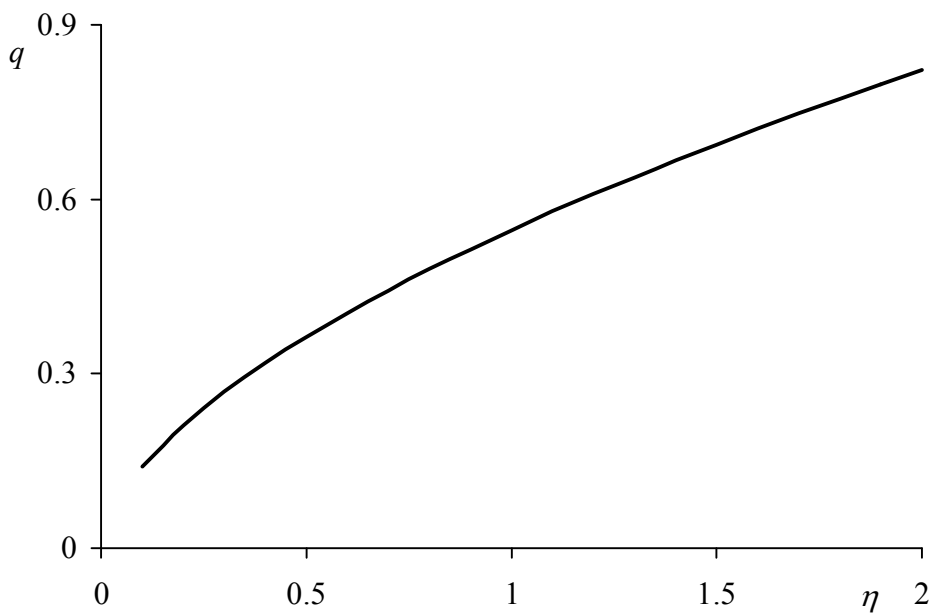


Рис. 4. Зависимость безразмерной функции $q(\eta)$ от относительной глубины потока

Следует отметить, что предлагаемая методика без соответствующей модернизации не может быть использована для уточнения аналогичных коэффициентов в зависимости коэффициента гидравлического сопротивления трения от числа Рейнольдса при течении воды с добавками гидродинамически активных веществ. При многократном прохождении раствора полимера через гидравлическую систему происходит его деструкция – разрыв молекул и уменьшение молекулярной массы, что снижает эффект уменьшения гидравлического сопротивления. Очевидно, что в потоке гидросмеси за счет соударений молекул полимера с твердыми частицами транспортируемого материала деструкция полимера будет происходить в

большой степени. Особенно сильному разрушению макромолекулы полимеров подвергаются при движении растворов через проточные части центробежных и поршневых насосов. Кроме того, эффективность действия полимера изменяется по длине трубы. Все эти факторы невозможно учесть при изучении безнапорного течения раствора полимера по трубопроводу ограниченной длины, а также затруднительным является соблюдение подобия по площади поверхности, на которой действуют касательные напряжения.

Выводы

1. Предложенная методика позволяет достоверно определять коэффициент пропорциональности и показатель степени в степенной зависимости коэффициента гидравлического сопротивления трения от числа Рейнольдса при напорном течении воды по полиэтиленовым трубам на основе натуральных экспериментов с безнапорным течением с использованием труб конкретного производителя.

2. Рекомендуется производить проектировочный расчет гидротранспортной системы с полиэтиленовыми трубами с использованием усредненных значений констант в степенной зависимости коэффициента гидравлического сопротивления трения от числа Рейнольдса, а после закупки труб уточнять их на основе гидравлических экспериментов по предлагаемой методике. Это позволит повысить точность расчетов параметров гидротранспорта твердых материалов.

Список литературы

1. Булат А.Ф., Витушко О.В., Семененко Е.В. Модели элементов гидротехнических систем горных предприятий: Монография / Ин-т геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины. – Днепропетровск: Герда, 2010. – 216 с.

2. Александров В.И. Методы снижения энергозатрат при гидравлическом транспортировании смесей высокой концентрации. – Санкт-Петербург: СПГГИ (ТУ), 2000. – 117 с.

3. Воронов, В.А. Снижение энергоемкости гидротранспортирования хвостов обогащения горных предприятий оптимизацией режимов работы грунтовых насосов и гравитационных сгустителей: Дис. ... канд. техн. наук: 05.05.06. – Санкт-Петербург, 2007. – 190 с.

4. Головачев Н.В. Обоснование технического обслуживания и ремонта оборудования для повышения эффективности эксплуатации системы гидротранспорта на горных предприятиях: Дис. ... канд. техн. наук: 05.05.06. – Санкт-Петербург, 2010. – 136 с.

5. Семененко, Е.В. Научные основы технологий гидромеханизации открытой разработки титан-цирконовых россыпей. – К.: Наукова думка, 2011. – 231 с.

6. Карасик В.М., Асауленко И.А., Витошкин Ю.К. Интенсификация гидротранспорта продуктов и отходов обогащения горно-обогатительных комбинатов. – К.: Наук. думка, 1976. – 156 с.

7. Обоснование параметров и режимов работы систем гидротранспорта горных предприятий / Ю.Д. Баранов, Б.А. Блюсс, Е.В. Семененко, В.Д. Шурыгин. – Д.: Новая идеология, 2006. – 416 с.

8. Шурыгин В.Д., Семененко Е.В., Никифорова Н.А. Анализ способов повышения эффективности работы гидротранспортного комплекса // Научно – технический и производственный журнал «Металлургическая и горнорудная промышленность». – №6. – 2005. – С. 70 – 74.

9. Семененко, Е.В., Татарко Л.Г. Расчет параметров гидротранспорта при использовании полиэтиленовых трубопроводов / Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. Тр // ИГТМ НАН Украины. – Днепропетровск. – 2012. – Вып. 107. – С. 233 – 244.

10. Швабауэр В., Гвоздев И., Гориловский М. Расчет гидравлических потерь давления в трубопроводе из пластмасс / Полимерные трубы. Украина. – 2006. – №1(1). – С. 46 – 52.

11. Добромислов А.Я. Таблицы для гидравлических расчетов трубопроводов из полимерных материалов. – М.: Изд-во ВНИИМП, 2004. – 209 с.

12. Силин Н.А., Витошкин Ю.К. Гидротранспорт угля по трубам. – К.: Наукова думка, 1964. – 88 с.

13. Криль С.И. Напорные взвесенесущие потоки. – К: Наукова думка, 1990. – 170 с.

14. Коберник С.Г., Войтенко В.И. Напорный гидротранспорт хвостов горно-обогатительных комбинатов. – К.: Наук. думка, 1967. – 140 с.

15. Курганов А.М., Федоров Н.Ф. Гидравлические расчеты систем водоснабжения и водоотведения. – Л.: Стройиздат, 1986. – 440 с.