

Планирование испытаний трубопроводных систем с использованием модели теплогидравлического режима на базе методов активной идентификации

О.А. Гребнева
к.т.н., с.н.с., oksana@isem.irk.ru
ИСЭМ СО РАН, г. Иркутск

Неопределенность информации о фактических характеристиках и параметрах трубопроводных систем является сдерживающим фактором эффективного применения методов математического и компьютерного моделирования для решения задач оптимальной реконструкции, наладки, разработки эксплуатационных режимов, диспетчерского управления. Применение существующих отраслевых методик не снимает остроты проблемы в связи с недостаточной регламентацией условий проведения испытаний и не гарантированностью получения результатов необходимой полноты и точности. В статье излагается оригинальная формализация задач испытания трубопроводных систем на базе привлечения математической модели установившихся теплогидравлических режимов. Предлагаемая методика состоит в пошаговой стратегии испытаний, обеспечивающей извлечение максимума информации при минимальном риске избыточных испытаний. На иллюстративном примере показана потенциальная эффективность проведения совместных теплогидравлических испытаний.

Uncertainty of information about actual characteristics and parameters of pipeline systems is a deterrent to the effective application of mathematical and computer modeling methods for solving problems of optimal reconstruction, adjustment, development of operational conditions, dispatching control. The application of existing methods does not alleviate the problem due to insufficient regulation of the test conditions and not to ensure the results of the required completeness and accuracy. The paper presents the original formalization of the problems of pipeline systems tests based on the attraction of a mathematical model of the established thermal and hydraulic conditions. The proposed technique consists in a stepwise testing strategy that ensures the extraction of maximum information with a minimum risk of excessive testing. An illustrative example shows the potential efficiency of joint thermal-hydraulic tests.

Современные трубопроводные системы (ТПС) представляют собой уникальные по своим масштабам и сложности сооружения, которые характеризуются неоднородностью, переменностью параметров и режимов работы.

Незнание истинных параметров и топологии трубопроводных систем – один из факторов, вносящих неопределенность при их управлении и эксплуатации. Незнание истинного состояния трубопроводов (их фактических характеристик) может привести к неадекватности используемых математических моделей.

Параметры и характеристики ТПС могут быть получены либо путем проведения специальных испытаний, либо с привлечением методов пассивной идентификации. Наиболее радикальным способом является применения методов активной идентификации для проведения испытаний ТПС.

1. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Испытания ТПС в зависимости от искомых параметров делятся на:

- гидравлические, в результате которых определяются гидравлические характеристики: коэффициенты эквивалентной шероховатости и гидравлические сопротивления участков);
- тепловые, в результате которых определяются теплофизические характеристики: тепловые потери, коэффициенты теплопередачи.

Отраслевые методики для проведения как гидравлических, так и тепловых испытаний [1-3] имеют ряд недостатков:

- 1) испытания в силу своей трудоемкости проводятся, как правило, только для характерных участков по срокам и условиям эксплуатации, что, однако, не гарантирует полноту картины о состоянии сети в целом;
- 2) ограничение по времени проведения испытаний связано с тем, что перед испытаниями необходимо провести ряд подготовительных работ (отключение некоторых лучей, установка перемычек и др.), например, для ТС испытания проводятся в неотапливаемый период;
- 3) условия проведения испытаний слабо регламентированы;
- 4) проблема расстановки измерительных приборов, их количества и состава не формализована;
- 5) гидравлические и тепловые характеристики определяются не индивидуально по каждому участку, а укрупненно для групп участков (полученные данные экстраполируются на все участки);
- 6) методики не предусматривают определения сопротивления потребителей, которые необходимы для адекватного моделирования режимов;
- 7) кроме того, гидравлические и тепловые испытания проводятся по отдельности, что связано с дополнительными материальными, трудовыми и временными затратами.

Во избежание этого в работе предлагается планирование совместных оптимальных теплогидравлических испытаний, целью которых является одновременное получение как гидравлических, так и теплофизических характеристик.

Проведение совместных теплогидравлических испытаний потенциально может обеспечить сокращение трудоемкости (уменьшение числа привлекаемых режимов, уменьшение числа производимых измерений) и времени проведения испытаний, а также повышение точности получаемых в результате испытаний параметров.

В зарубежной литературе решение такого рода задач основано на использовании методов пассивной идентификации и в основном для систем водоснабжения [4-6].

В качестве методической базы для данных исследований выступает разработанная в ИСЭМ СО РАН теория гидравлических цепей [7], как междотраслевая научно-техническая дисциплина, обеспечивающая единый векторно-матричный язык и модельный аппарат для описания широкого класса трубопроводных систем различного типа и назначения. В рамках данной теории была сформулирована задача активной идентификации трубопроводных систем и разработана новая методика [8-11]. Ранее эффективность данной методики исследовалась применительно к задачам планирования гидравлических испытаний. В статье проводятся исследования ее применимости для планирования совместных теплогидравлических испытаний с использованием расширенной модели неизоотермического потокораспределения.

2. Объект, цель и задачи исследования

Основная цель работы заключается в адаптации алгоритмов и методов активной идентификации для планирования совместных теплогидравлических испытаний ТПС. Для этого ставились следующие задачи:

- адаптировать разработанную ранее методику планирования активной идентификации для возможности ее применения к планированию совместных теплогидравлических испытаний ТПС;
- на численном примере показать:
 - эффективность применения методики активной идентификации;
 - эффективность проведения совместных теплогидравлических испытаний.

Математическая постановка задачи. Основная цель планирования испытаний заключается в воздействии на главные факторы, от которых зависит точность получаемых параметров и характеристик ТПС (коэффициентов гидравлического сопротивления и коэффициентов теплопередачи). При этом, для того, что испытания были реализуемы, необходимо учитывать ограничения: 1) накладываемые на параметры режима (в том числе и варьируемые), которые в результате управлений не должны выходить за технологически допустимые пределы; 2) на количества и места возможной установки измерительных приборов. Задача решается в пространстве варьируемых параметров.

В общем виде задача планирования экспериментов может быть представлена следующим образом [8,9]:

$$\min_{N, \delta, X_R} \{ \det[C_\alpha(X_R^{(1)}, \dots, X_R^{(N)}, \delta^{(1)}, \dots, \delta^{(N)}, \alpha)] \} \quad (1)$$

при ограничениях

$$\underline{R}^{(u)} \leq R^{(u)} = \begin{pmatrix} Y_R^{(u)}(X_R^{(u)}, \alpha) \\ X_R^{(u)} \end{pmatrix} \leq \bar{R}^{(u)}, \quad u = 1, \dots, N, \quad (2)$$

$$q \leq I = \sum_{j=1}^I \delta_j^{(u)} \leq \bar{I}, \quad (3)$$

$$1 < N < \bar{N}, \quad (4)$$

$$\det(C_\alpha) \leq \bar{C}, \quad (5)$$

где $\det(\cdot)$ – определитель матрицы; C_α – ковариационная матрица параметров элементов; $R^{(u)}$ – вектор параметров u -го режима; $\underline{R}^{(u)}$ и $\bar{R}^{(u)}$ – нижний и верхний пределы изменения параметров режима; u – индекс режима; N – количество режимов; \bar{N} – максимально допустимое число режимов (экспериментов); $X_R^{(u)}, Y_R^{(u)}$ – соответственно векторы независимых и зависимых параметров u -го режима; $\delta^{(u)}$ – \bar{I} -мерный вектор булевых переменных в u -м режиме с компонентами: $\delta_j^{(u)} = 1$, если j -й параметр измеряется в u -м режиме и $\delta_j^{(u)} = 0$ в противном случае, $j = 1, \dots, \bar{I}$; α – вектор параметров элементов; \bar{I} – число доступных для измерения параметров из множества компонент вектора R ; q – минимально необходимое число измерений; I – число измеряемых параметров; \bar{C} – заданный уровень точности.

В качестве информационного критерия используется определитель ковариационной матрицы параметров элементов (D -критерий) как мера точности оценивания вектора неизвестных параметров в целом.

Общая схема последовательной активной идентификации ТПС при планировании оптимальных испытаний может быть представлена в виде следующих этапов

- 1) задаются априорные значения α_0 и $C_{\alpha,0}$; полагаем $u = 1$;
- 2) решается задача планирования u -го режима испытаний [12];
- 3) в запланированном режиме решается задача оптимизации состава измерений [13], основной целью которой является извлечение максимума информации о состоянии и параметрах системы в этих режимах с помощью измерительных приборов при ограничениях на их общее число (или суммарную стоимость) и места размещения. При этом задача планирования оптимальной расстановки измерительных приборов заключается в минимизации их количества при ограничениях, накладываемых на точность определяемых в результате планирования параметров, на места установки измерительных приборов и их количества;
- 4) проводится эксперимент;
- 5) обработка результатов u -го эксперимента, которая сводится к решению задачи оценивания на минимум [14].

В результате решения задачи определяется вектор оценок параметров элементов $\hat{\alpha}_u$ и значение апостериорной ковариационной матрицы параметров элементов $\hat{C}_\alpha(\hat{\alpha}^{(u)})$.

Если $\hat{\alpha}^{(u)}$ и $\hat{C}_\alpha(\hat{\alpha}^{(u)})$ не удовлетворяют требуемой точности, то при условии $1 < u < \bar{N}$ полагаем $u = u + 1$ и переходим на п.2. Если точность оценивания достигнута, расчёт окончен.

В качестве исходной модели для теплогидравлических испытаний предлагается использовать модель теплогидравлического режима [15]

$$U(Z) = \begin{bmatrix} U_r(Z) \\ U_T(Z) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{A}x - \bar{Q} \\ \bar{A}^T \bar{P} - f(s, x) \\ \bar{A}_1 x t_n - \bar{A}_2 x t_k - \theta \\ \chi_n (t_n - \bar{A}_n^T T) - \chi_k (t_k - \bar{A}_k^T T) \\ t_k - \Phi(x, P, t_n, t_{окр}, k) \end{bmatrix} = 0, \quad (6)$$

где $Z = \{x, \bar{Q}, \bar{P}, s, t_n, t_k, T, \theta\}$ – вектор параметров модели; \bar{A} – $m \times n$ -матрица инцидентий; \bar{A}_1 – матрица ориентирования ветвей, полученная из матрицы \bar{A} заменой элементов, равных -1 , на 0 ; \bar{A}_2 – матрица ориентирования ветвей, полученная из матрицы \bar{A} заменой элементов, равных 1 , на 0 ; X – $n \times n$ -диагональная матрица с компонентами x_i на главной диагонали; \bar{Q} и \bar{P} – векторы узловых расходов и давлений в m узлах; x и s – векторы расходов и гидравлических сопротивлений n -ветвей; t_n, t_k – векторы температур соответственно в начале и в конце ветви; \bar{T} – вектор температур смешанных потоков в узлах; $\theta = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_m)$ – вектор узловых расходов тепла; $\theta_j = Q_j t_{npj}$ в случае притока, $\theta_j = Q_j t_{отj}$ в случае отбора, t_{npj} – температура притока, $t_{отj}$ – температура отбора; $\chi_n = \text{diag}\{\bar{\chi}_1, \dots, \bar{\chi}_n\}$ и $\chi_k = \text{diag}\{\bar{\chi}_1, \dots, \bar{\chi}_n\}$ – диагональные матрицы; $\bar{\chi}_{ni} = [1 + \text{sign}(x_i)] / 2$, $\bar{\chi}_{ki} = [1 - \text{sign}(x_i)] / 2$, которые обладают следующими свойствами:

$$\bar{\chi}_{ni} = 1, \text{ если } x_i > 0, \text{ и } \bar{\chi}_{ni} = 0, \text{ если } x_i < 0, \quad (7)$$

$$\bar{\chi}_{ki} = 1, \text{ если } x_i < 0, \text{ и } \bar{\chi}_{ki} = 0, \text{ если } x_i > 0. \quad (8)$$

В работах [14,16,17] было показано, что, не смотря на возросшую сложность математических моделей теплогидравлического режима, их удается значительно быстрее переопределить (по сравнению с моделями изотермического потокораспределения вида $U_r(Z)$) благодаря привлечению данных измерений температур.

В роли конкретной зависимости для падения температуры на i -й ветви принята формула Шухова, которая имеет следующий вид:

$$t_{ki} = t_{окр} + \frac{t_{ni} - t_{окр}}{\exp\left(\frac{k_i L_i \pi d_i}{C x_i}\right)}, \quad (9)$$

где $t_{окр}$ – температура окружающей среды; L_i, d_i – длина и внутренний диаметр трубопровода i -го участка сети; C – теплоемкость среды; k_i – коэффициент теплопередачи i -го участка сети.

3. Расчётные исследования

Цель расчётных исследований – показать преимущества проведения совместных тепло гидравлических испытаний над отдельными (тепловыми и гидравлическими). Для этого ставились следующие задачи:

- на конкретном примере провести цикл расчетов для проведения разных типов испытаний с использованием разных математических моделей с целью проверки эффекта от применения методики активной идентификации;
- исследовать влияние выбора критерия на результаты планирования;
- исследовать влияние режима на оптимальный состав измерительных приборов.

Исследования проводились на примере условной ТПС, изображенной на рис. 1.

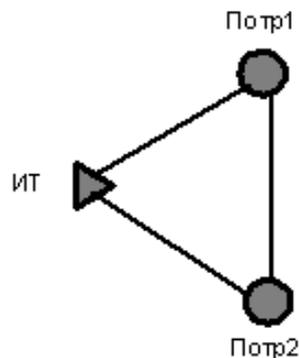


рис. 1. Принципиальная и расчетная схемы условной ТПС.
ИТ – источник; Потр 1, Потр 2 – потребитель 1 и 2, соответственно; ТСч – теплосчётчик

Расчетные условия: Давление в первом узле считаем фиксированным. Для параметров, которые возможно измерить, были приняты следующие значения стандартных отклонений: для давлений $\sigma_p = 0.2$; для узловых

расходов $\sigma_{Q_j} = 0.5$; для температур притока и отборов, а также температур потоков в начале и конце участков $\sigma_{t_{npj}} = 0.5, \sigma_{t_{отj}} = 0.5, \sigma_{t_{нi}} = 0.5, \sigma_{t_{кi}} = 0.5$. При планировании первого эксперимента необходимо задаться начальным приближением значений сопротивлений $s_0 = (0.2627 \cdot 10^{-4}, 0.3627 \cdot 10^{-4}, 0.4627 \cdot 10^{-4})^T$ (м·ч²/м⁶). Однако кроме самих значений гидравлических сопротивлений, необходимо задаться и стандартным отклонением σ_s , правило экспертного задания которых приводится в [18]. В соответствии с [18] принято $\sigma_{s_i} = 0.1 \cdot 10^{-4}$. Температура окружающей среды $t_{окр} = 5 \text{ }^\circ\text{C}$.

Для проведения анализа результатов численного эксперимента были установлены предельные значения по используемому критерию: для гидравлических параметров $\bar{C}_{C_s} = 8.0 \cdot 10^{-27}$; для теплофизических $\bar{C}_{C_k} = 1.0 \cdot 10^{-6}$.

Так как остановить процесс решения можно лишь по результатам оценивания, накладывая ограничение на определитель ковариационной матрицы параметров элементов. Возникает вопрос о том, каким образом наложить это ограничение и как по нему оценить качество получаемой в результате испытаний информации. Поэтому в процессе численных исследований было принято решение ввести дополнительный критерий, определяемый по формуле

$$\gamma = \max_j \frac{\hat{\sigma}_j^2}{\tilde{\sigma}_j^2}, \quad (10)$$

где $\hat{\sigma}_j^2$ – дисперсия, полученная по результатам оценивания; $\tilde{\sigma}_j^2$ – дисперсия, полученная по результатам измерения.

Критерий γ показывает отношение предсказанной дисперсии к дисперсии прямого измерения. Таким образом, критерий позволяет характеризовать адекватность используемых моделей ТПС.

Планирование режима испытаний. Задача характеризуется большой размерностью, нелинейностью, многоэкстремальностью. Для ее решения в работе [12] предложено использовать генетические алгоритмы, которые нашли широкое применение. Решение задачи сводится к направленному поиску с элементами «случайных блужданий» с помощью операторов селекции. При этом, в конечном счете, образуется некоторое подмножество точек, отклонение целевой функции в которых минимально.

В результате планирования режима испытаний находится оптимальное сочетание вектора варьируемых параметров, которое позволяет извлечь максимум информации о системе в целом.

Зависимые параметры модели включают в себя векторы: узловых расходов, расходов на ветвях, температур в начале и в конце ветвей, а также температур смешения потоков в узлах и температур отборов

$Y = [Q^T, x^T, t_n^T, t_k^T, \theta^T, T^T, t_{от}^T]^T$. В качестве независимых параметров модели выступают вектора узловых давлений, параметров элементов и температура притока $X = [P^T, \alpha^T, t_{np}^T]^T$. Вектор параметров элементов задается в зависимости от типа планируемого испытания. Полный вектор измеряемых параметров состоит из векторов узловых давлений, узловых расходов и векторов температур в начале и в конце ветвей $Z_1 = [P, Q, t_n, t_k]^T$.

Предполагалось, что имеется возможность на данной сети управлять температурой притока и отборами на потребителях 1 и 2, которые и выступали в качестве варьируемых параметров режима. Диапазоны изменения варьируемых параметров: $290 \leq |Q_{потр1}| \leq 490$, $10 \leq |Q_{потр2}| \leq 210$, $70 \leq t_{np} \leq 95$ (Q_1, Q_2 – соответственно расходы в узлах потребления 1 и 2).

Результаты численных исследований задачи планирования режимов приведены в таблице 2.

Таблица 2

Результаты планирования теплогидравлических режимов

Режим	t_{np}	Q_1	Q_2	$\det C_{sk}$	$\det C_s$	$\det C_k$	$\gamma = \max_j \frac{\hat{\sigma}_j^2}{\tilde{\sigma}_j^2}$
0	начальная популяция						
1	100	340	60	$5.922 \cdot 10^{-40}$	$9.16 \cdot 10^{-41}$	$8.89 \cdot 10^{-6}$	0.98

Число запланированных режимов при проведении совместных теплогидравлических испытаний (модель (6)) составляет 1 режим (табл. 2). Из табл. 2 видно, что при использовании в качестве информационного критерия $\det C_{sk}$ достигается высокая точность, как по гидравлическим, так и по теплофизическим параметрам ТПС.

Следовательно, с точки зрения уменьшения количества запланированных режимов, а также повышения точности оценивания как гидравлических, так и теплофизических параметров ТПС предпочтительно проведение совместных теплогидравлических испытаний.

Планирование оптимальной расстановки измерений для испытаний ТПС. Задача формирования оптимального состава измерительных приборов основывается на методике, приведенной в [13]. Суть методики заключается в последовательном сокращении максимально допустимого состава измерительных приборов исключением того измерения, которое бы минимально ухудшило информационный критерий. Данная методика позволяет получить глобальное решение за конечное ограниченное число шагов.

Результаты численных исследований для запланированного теплогидравлического режима (табл. 2) представлены в таблице 3.

Оптимальная расстановка измерительных приборов в запланированных режимах

Удаляемое измерение	Значение det(Csk)	Удаляемое измерение	Значение det(Csk)	Удаляемое измерение	Значение det(Csk)
Исходный состав вектора измерений $P_1, P_2, P_3, Q_{ИТ}, Q_2, Q_3, x_1, x_2, x_3, t_{пр}, t_{ом2}, t_{ом3}, t_{н1}, t_{н2}, t_{н3}, t_{к1}, t_{к2}, t_{к3}$					
$0.5922 \cdot 10^{-41}$					
Q_2	$0.1888 \cdot 10^{-40}$	$t_{н2}$	$0.2208 \cdot 10^{-37}$	P_2	$0.4811 \cdot 10^{-33}$
Q_1	$0.1907 \cdot 10^{-40}$	$t_{н1}$	$0.2396 \cdot 10^{-36}$	$t_{к3}$	$0.7069 \cdot 10^{-32}$
$Q_{ИТ}$	$0.2057 \cdot 10^{-39}$	$t_{н3}$	$0.2982 \cdot 10^{-35}$	$t_{к2}$	$0.1116 \cdot 10^{-32}$
$t_{пр}$	$0.2152 \cdot 10^{-38}$	P_3	$0.3784 \cdot 10^{-34}$	x_2	$0.4811 \cdot 10^{-33}$
Оптимальный состав измерений $P_1, x_1, x_3, t_{к1}, t_{пр}, t_{ом2}, t_{ом3}$					

Как видно из таблицы, режимы имеют разный оптимальный состав измерительных приборов. Однако, методика позволяет остановиться на любом шаге решения задачи и выбрать вариант состава измерительных приборов с требуемым количеством измерительных приборов и минимальным ущербом по точности.

Выводы

В работе исследованы особенности задачи планирования совместных теплогидравлических режимов. Апробирован алгоритм планирования режимов испытаний и оптимальной расстановки измерительных приборов с использованием неизотермической модели потокораспределения.

На численных примерах показано, что возможно сокращение числа экспериментов, что потенциально приводит к

- уменьшению трудоемкости;
- повышению точности по сравнению с традиционными подходами;
- тому, что в рамках предлагаемой методики можно планировать испытания с использованием различных моделей потокораспределения.

Литература

1. Методические указания по испытанию водяных тепловых сетей на гидравлические потери. РД34.20.519-97/ Служба передового опыта. – М.: 1998. – 24 с.
2. Методические указания по испытанию водяных тепловых сетей на тепловые потери. РД34.20.519-97/ Служба передового опыта. – М.: 1998. – 24 с.
3. Методические указания по испытанию водяных тепловых сетей на гидравлические потери без нарушения режимов эксплуатации. РД 153.34.1-20.526-00. АООТ «ВТИ». – 2001.
4. Srinivasa Lingireddy, Lindell E. Ormsbee. Hydraulic network calibration using genetic optimization // Civil Engineering and Environmental Systems. Vol 19(1). - 2012. Pp. 13-39.
5. S. Alvisi, E. Creaco, M. Franchini. Segment identification in water distribution systems // Urban Water Journal. Vol. 8. No 4, August 2011. Pp. 203-217.
6. Guoping Yu., Roger S. Powell. Optimal design of meter placement in water distribution systems // International Journal of Systems Science. -1994, Vol. 25. No 12. Pp. 2155-2166.
7. Меренков А.П., Хасилев В.Я. Теория гидравлических цепей. –М.: Наука, 1985. – 280с.
8. Гребнева О.А. Исследование задач и разработка алгоритмов планирования условий проведения активной идентификации трубопроводных систем: автореф. дисс... канд. техн. наук. – Иркутск, 2005. – 26 с.
9. Гребнева О.А., Новицкий Н.Н. Комплексное планирование условий проведения активной идентификации трубопроводных систем. Трубопроводные системы энергетики. Методы математического моделирования и оптимизации: Сб. науч. тр. – Новосибирск: Наука, 2007. – С. 177–187.
10. Гребнева О.А., Новицкий Н.Н. Оптимальное планирование и обработка результатов испытаний тепловых сетей на гидравлические и тепловые потери // Теплоэнергетика. 2014. № 10. С.62-67.
11. Гребнева О.А., Новицкий Н.Н. Исследование эффективности методов активной идентификации для испытаний тепловых сетей // Трубопроводные системы энергетики: Методические и прикладные проблемы математического моделирования. – Новосибирск: Наука, 2015.- С.220-232.
12. Гребнева О.А. Численное исследование задач планирования режимов для гидравлических испытаний тепловых сетей //Системные исследования в энергетике. – Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2001. – 264с. –(Труды молодых ученых ИСЭМ СО РАН, Вып.31).С.48-56.
13. Гребнева О.А., Новицкий Н.Н. Оптимизация состава измерений для идентификации трубопроводных систем // Теплоэнергетика. 2014. № 9. С.70-75.
14. Новицкий Н.Н. Оценка параметров гидравлических цепей. – Новосибирск.: Наука, 1998. – 215 с.
15. Новицкий Н.Н., Токарев В.В. Расчет установившихся теплогидравлических режимов работы тепловых сетей по ограниченному количеству измерений // Теплофизика и аэромеханика. 2007. Т. 14. № 2. С. 289-298.
16. Новицкий Н.Н. Разработка и применение методов системной идентификации трубопроводных систем как гидравлических цепей с переменными параметрами: автореф. дис. ...канд. техн. наук. – Иркутск. – 1986. – 25с.
17. Новицкий Н.Н., Сидлер В.Г. Идентификация трубопроводных систем как гидравлических цепей с переменными параметрами // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. –1984. – №4. – С. 155-162.
18. Гребнева О.А., Новицкий Н.Н. Влияние априорной информации на качество активной идентификации трубопроводных систем // Трубопроводные системы энергетики. Развитие теории и методов математического моделирования и оптимизации. – Новосибирск: Наука, 2008.- С.245-254.