

## ВЛИЯНИЕ УГЛА ПОДЪЕМА ТРУБОПРОВОДА И ТЕМПЕРАТУРЫ СУСПЕНЗИИ НА КОЭФФИЦИЕНТ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРИ ГИДРОТРАНСПОРТЕ ВУС

Федотов А. И., Шамсутдинов Э. В.

*Исследовательский центр проблем энергетики Федерального государственного бюджетного учреждения науки Казанского научного центра Российской академии наук, г. Казань, Россия (420111, Казань, ул. Лобачевского, 2/31), e-mail: fedotovran@mail.ru, [eshamsutd.kazan@mail.ru](mailto:eshamsutd.kazan@mail.ru)*

Представлены результаты экспериментальных исследований процессов гидротранспорта водоугольной суспензии в трубопроводах. Приведена принципиальная схема экспериментального стенда и условия проведения эксперимента. Проведен анализ данных экспериментальных исследований по определению вязкости суспензии на ротационном вискозиметре. Представлена зависимость перепада давления от скорости потока при различных температурах суспензии и углах подъема рабочего участка. Проведен анализ изменения коэффициента гидродинамического сопротивления в зависимости от углов подъема рабочего участка и температуры суспензии для различных гидравлических режимов работы оборудования. Выявлено, что независимо от рассматриваемого параметра (температура суспензии или угол подъема рабочего участка) зависимость коэффициента гидродинамического сопротивления от числа  $Re$  имеет гиперболический характер. С увеличением скорости движения суспензии значения коэффициента гидродинамического сопротивления падают, асимптотически стремясь после определенного значения числа  $Re$  к некоторому минимальному значению. Результаты исследований могут быть использованы при выборе режимов гидротранспорта водоугольного топлива, в особенности, в пределах котельного цеха, характеризующегося сложной траекторией трубопроводов.

Ключевые слова: водоугольная суспензия, транспортирование, экспериментальное исследование.

## EFFECT OF GROWTH ANGLE OF PIPELINE AND TEMPERATURE SUSPENSION OF COEFFICIENT HYDRODYNAMIC RESISTANCE IN HYDROTRANSPORT COAL WATER SLURRY

Fedotov A. I., Shamsutdinov E.V.

*The research center of power engineering problems of institution the Russian academy of sciences the Kazan scientific centre RAS, Kazan, Russia (420111, Kazan, Lobachevsky's street, 2/31), e-mail: fedotovran@mail.ru, [eshamsutd.kazan@mail.ru](mailto:eshamsutd.kazan@mail.ru)*

Presents a generalization of experimental studies of hydrotransport coal water slurry in the pipeline. Shows concept experimental stand and the conditions of the experiment. The analysis of the data experimental research by definition viscosity of suspension on rotational viscometer is carried out. Dependence of pressure difference on speed of a stream is presented at various temperatures of suspension and angles of lead of a working site. The analysis of change in the coefficient hydrodynamic resistance depending on angles of lead a working site and temperature of suspension for various hydraulic operating modes of the equipment is carried out. It is revealed that irrespective of the considered parameter (temperature of suspension or an angle of lead of a working site) dependence of coefficient hydrodynamic resistance on number  $Re$  has hyperbolic character. With increase in speed of movement suspension value of coefficient hydrodynamic resistance fall, asymptotic aspiring after certain value of number  $Re$  to some minimum value. Results of researches can be used at a choice of modes of hydrotransport of water coal fuel, in particular within the boiler shop characterized by a difficult trajectory of pipelines.

Key words: coal-water slurry, transportation, experimental study.

### Введение

Согласно «Энергетической стратегии России на период до 2030 года», основную часть электроэнергии планируется по-прежнему получать за счет выработки ее на тепловых электростанциях [10]. При этом при производстве электроэнергии в нашей стране в 2010 г. доля природного газа составила 49,8 %, а угля – 22,3 %. Это свидетельствует о том, что уголь

как топливо будет еще долгое время занимать значительную долю в топливно-энергетическом балансе нашей страны. Необходимость использования угля с учетом существующих экологических требований приводит к необходимости создания и использования экологически чистых угольных технологий, обеспечивающих высокую полноту использования топлива при минимальной нагрузке на окружающую среду [3–4].

Таким образом, становится актуальным использование твердого топлива для приготовления водоугольных суспензий (ВУС), ведь такие суспензии обладают рядом преимуществ, свойственных жидким горючим веществам: их можно легко транспортировать по трубам на большие расстояния, распылять из форсунок в топках, хранить и перекачивать так же, как жидкое топливо. Заинтересованность в энергетическом использовании водоугольного топлива связана также с возможностью минимизации затрат на его транспортирование. По мнению авторов, централизованное производство ВУС в районе добычи угля с доставкой по трубопроводу остается единственной возможностью компенсировать убытки в процессах приготовления и сжигания [8].

Исследования в области использования водоугольных суспензий (водоугольных топлив) в настоящее время проводятся достаточно активно. В ряде работ российских ученых [1, 7, 9] показана экономическая эффективность использования ВУС, которая возрастает при увеличении объема производства и дальности его гидротранспорта. В то же время существующие инженерные методики и методы расчета гидротранспорта ВУС на промышленных котельных и ТЭС не учитывают режимы работы и взаимное расположение оборудования, что не позволяет с достаточной степенью точности определить затраты энергии на транспортировку ВУС. Связано это с отсутствием достаточного количества экспериментально-расчетных данных, обобщение которых позволит получить зависимости, пригодные для инженерного расчета с высокой степенью достоверности по отношению к реальным процессам.

Работа посвящена анализу и предварительной оценке результатов экспериментальных исследований гидротранспорта ВУС. Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (госконтракты № 02.740.11.0753 и №П1014 в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы) и Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 12-08-97055-р\_поволжье\_a).

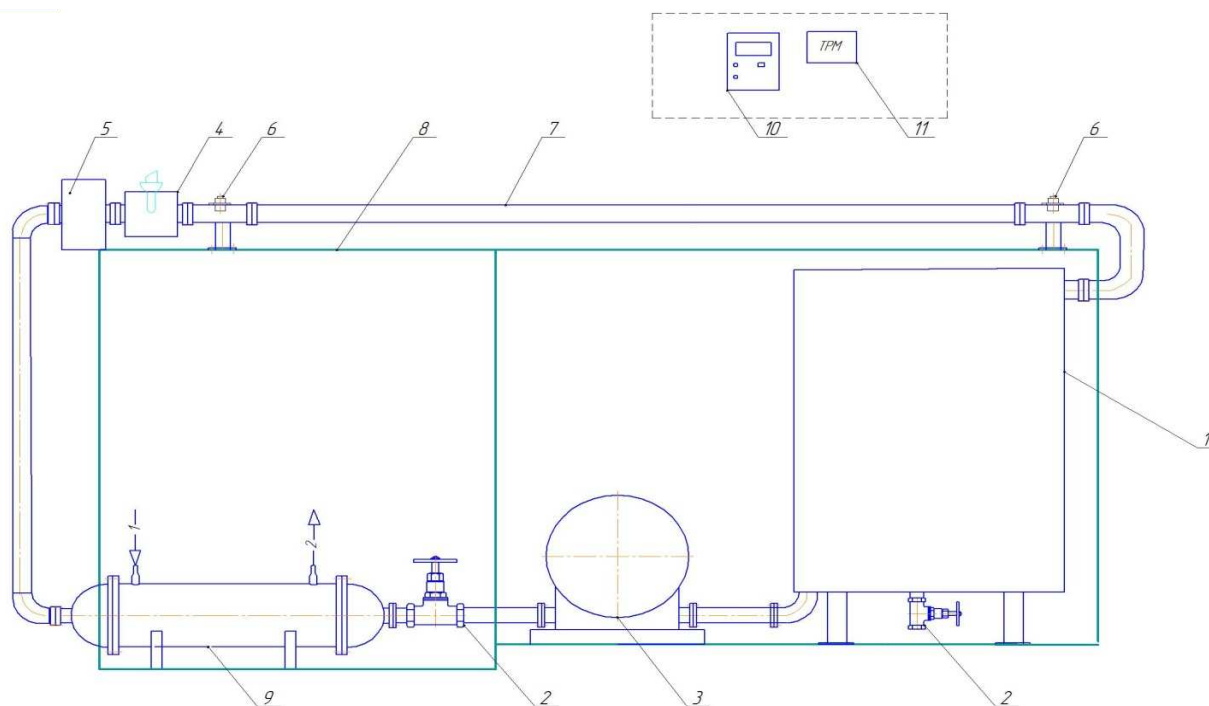
### **Экспериментальный стенд и условия проведения эксперимента**

Для физического моделирования процессов гидротранспорта ВУС разработан и собран экспериментальный стенд, принципиальная схема которого представлена на рисунке 1 [5, 6].

Принцип работы экспериментального стенда следующий. Водоугольная суспензия из емкости (поз. 1) перистальтическим насосом (поз. 3) подается через успокоительную камеру

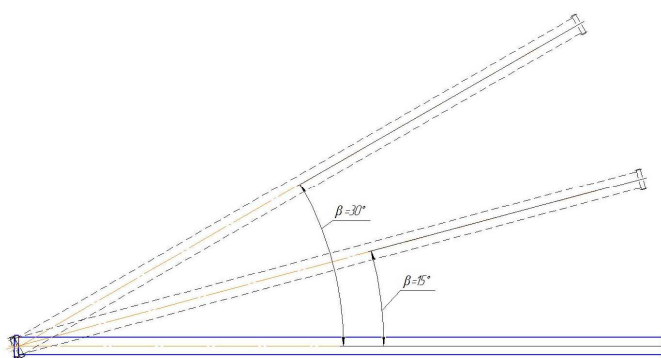
(поз. 5) на рабочий участок (поз. 7), располагаемый на ступень-установке (поз. 8). Давление замеряется на входе и на выходе рабочего участка преобразователем давления (поз. 6). При помощи термопреобразователя (поз. 4) определяется температура ВУС. Нагрев ВУС осуществляется при помощи кожухотрубчатого теплообменника (поз. 9). Частотный преобразователь (поз. 10) используется для регулирования расхода суспензии. Показания температуры и давления передаются на измеритель-регулятор (поз. 11).

В ходе эксперимента проводилась оценка влияния изменений температуры суспензии и угла подъема  $\beta$  рабочего участка (рисунок 2) на перепад давления. Экспериментальное исследование проводилось для водоугольной суспензии с 50 % содержанием угля. Температура суспензии  $t$  изменялась в диапазоне от 30 до 60 °С, который обусловлен возможными эксплуатационными параметрами. Контроль температуры производился термопреобразователем, установленным перед рабочим участком. Эксперимент проводился для ламинарного режима течения ВУС. Потери давления регистрировались преобразователями давления.



1 – бак ( $V=200$  л); 2 – вентиль шаровый; 3 – насос перистальтический; 4 – термопреобразователь ДТС; 5 – успокоительная камера; 6 – преобразователь давления; 7 – рабочий участок; 8 – установка ступень; 9 – блок нагрева; 10 – частотный преобразователь; 11 – измеритель-регулятор.

**Рисунок 1.** Принципиальная схема экспериментальной установки



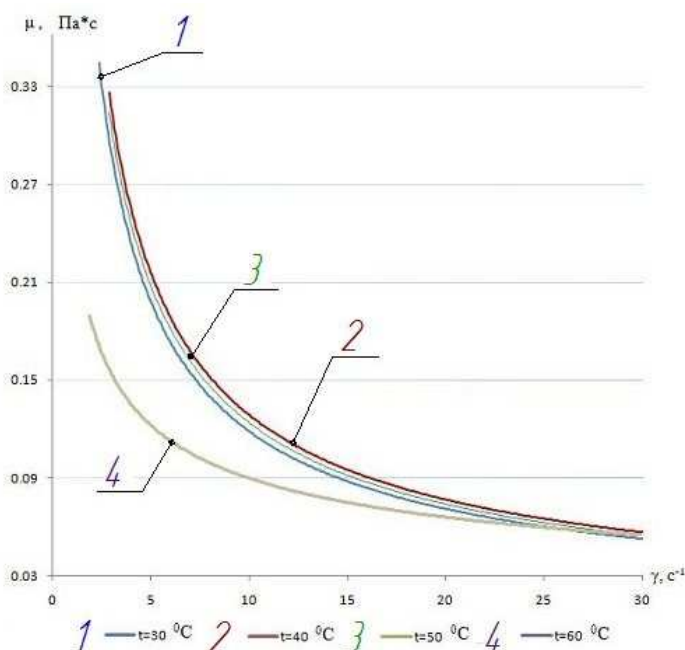
**Рисунок 2.** Изменение угла подъема  $\beta$  рабочего участка

Ниже приведены диапазоны изменения варьируемых параметров:

Параметр	Диапазон изменения
Расход $Q$ , м <sup>3</sup> /ч	0,38–2,1
Скорость $v$ , м/с	0,084–0,46
Число Re	48,8–900
Температура, $t$ , °С	30–60
Динамическая вязкость $\mu$ , Па*с	0,05–0,37
Угол подъема рабочего участка $\beta$ , градусов	0–45, с шагом 15 <sup>0</sup>

### Результаты экспериментальных исследований

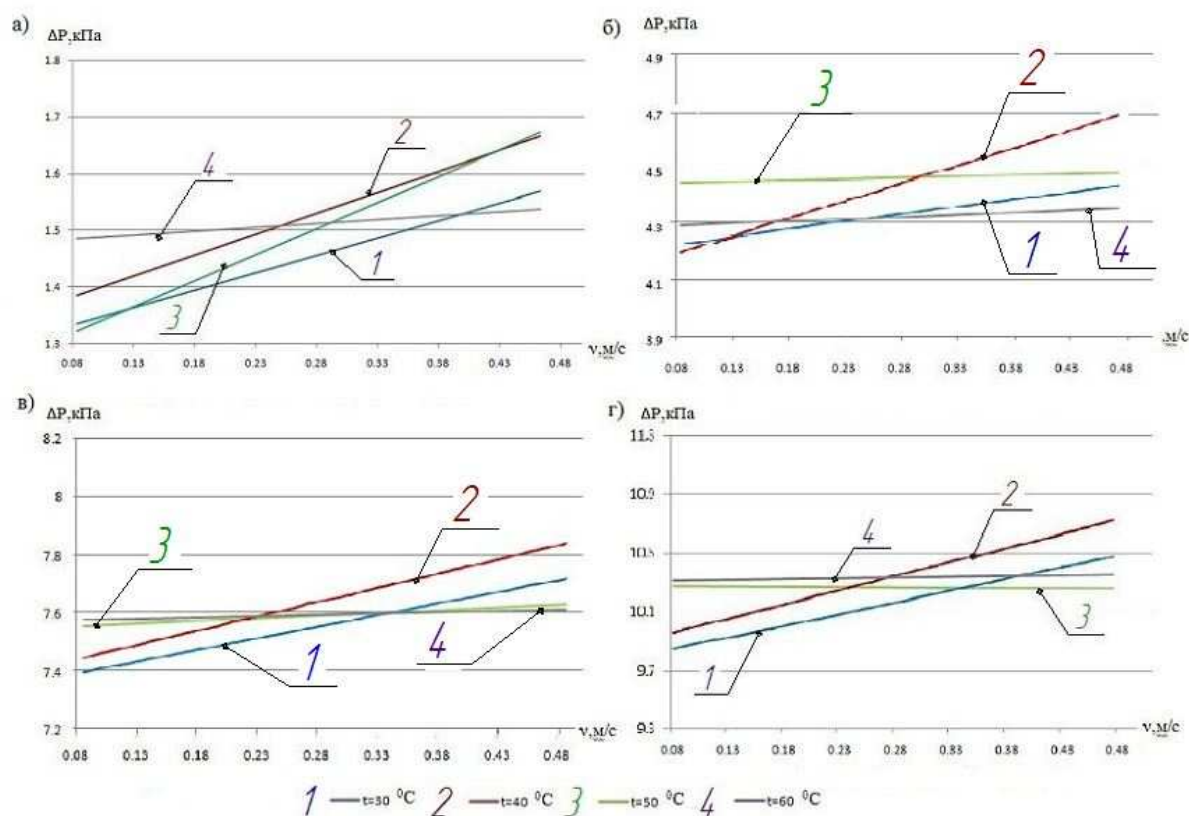
В связи с тем, что предварительный анализ выявил значительное влияние вязкости исследуемой среды на характер происходящих процессов, до начала работы на стенде были проведены экспериментальные исследования по определению вязкости ВУС на ротационном вискозиметре Rheomat RM 100 с системой измерительных цилиндров «din 1–3». Результаты экспериментальных исследований представлены на рисунке 3 как зависимости вида  $\mu=f(\gamma, t)$ , где  $\gamma$  – скорость сдвига, с<sup>-1</sup>;  $t$  – температура суспензии, °С.



**Рисунок 3.** Зависимость вязкости ( $\mu$ ) ВУС от скорости сдвига ( $\gamma$ )

Для применения полученных значений  $\mu$  была использована зависимость между  $v$  и  $\gamma$ , имеющая следующий вид  $\gamma = \frac{8v}{d}$ . Как видно из рисунка 3, в диапазоне температур  $30 \leq t \leq 50$  экспериментальные значения  $\mu$  лежат в достаточно узком «коридоре». Дальнейшее увеличение температуры до  $t=60^\circ\text{C}$  приводит к кратному снижению значения  $\mu$ , по отношению к значению вязкости при  $t=30^\circ\text{C}$ . Данный эффект ярко выражен и наблюдается для  $\gamma < 6\text{с}^{-1}$ . Далее при  $6 < \gamma < 23$  зависимость  $\mu = f(\gamma, t)$  при разных температурных режимах, начинает асимптотически стремиться к значению вязкости, близкому к  $\mu = 0,05 \text{ Па}\cdot\text{с}$ . В качестве предварительной оценки можно констатировать, что при малых значениях градиента скорости  $\gamma$  сильное влияние на величину вязкости  $\mu$  оказывает температура исследуемой суспензии. Увеличение градиента скорости приводит к сильному падению вязкости и практически отсутствию влияния температуры на значение  $\mu$ .

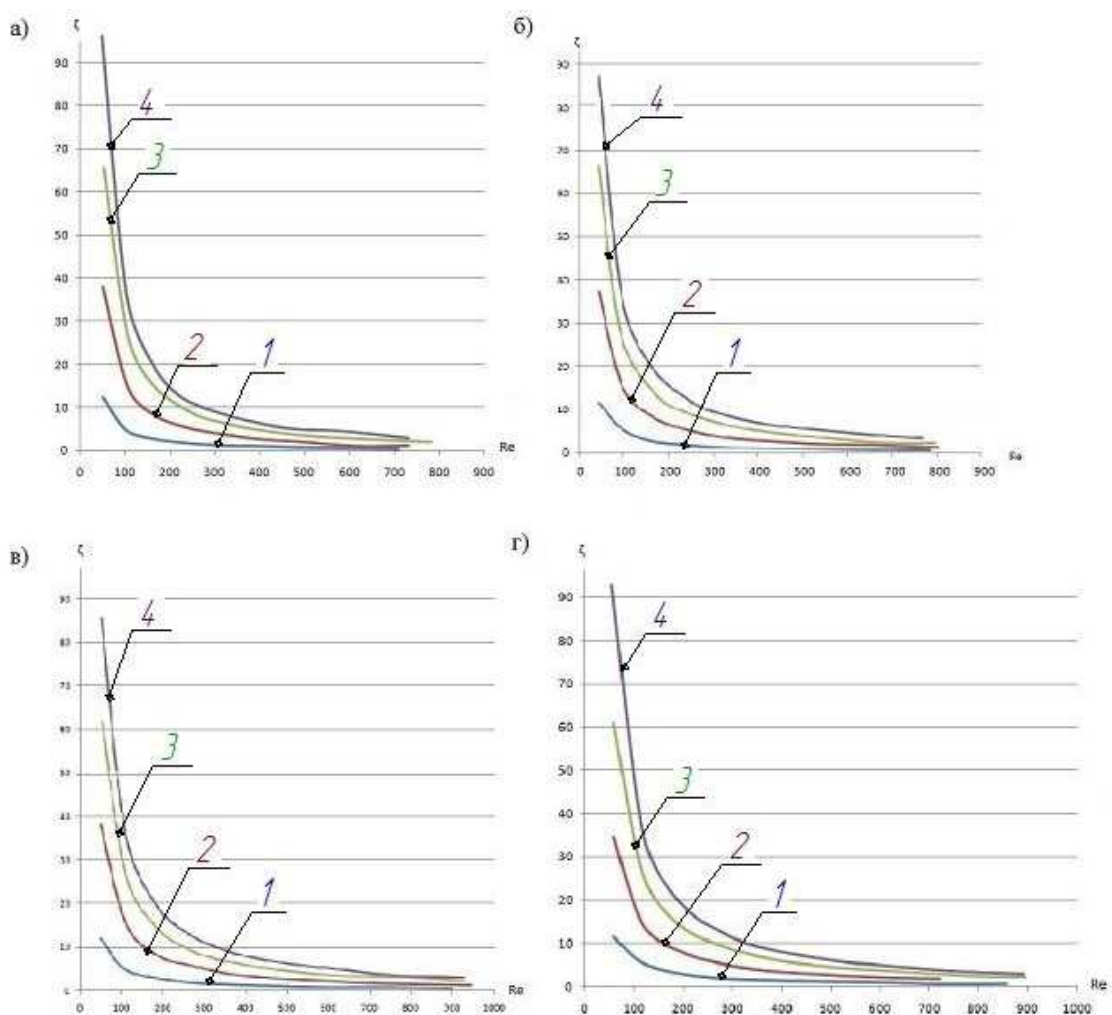
Далее на рисунках 4–5 приведены результаты экспериментальных исследований зависимости перепада давления  $\Delta P$ , кПа и коэффициента гидродинамического сопротивления  $\xi$  от гидравлических режимов работы оборудования, углов подъема рабочего участка и температуры среды.



**Рисунок 4.** Зависимость  $\Delta P$  при различных углах подъема рабочего участка  $\beta$

На рисунке 4 представлена зависимость перепада давления от скорости ВУС при различных температурах и углах подъема рабочего участка. Из графика на рисунке 4а

(горизонтальный участок) видно, что прирост давления в зависимости от скорости движения суспензии сильно зависит от ее температуры. Максимальный прирост давления (до 27 %) наблюдается при  $t=50^{\circ}\text{C}$ , минимальный (до 3 %) – при  $t=60^{\circ}\text{C}$ . На наш взгляд, это связано как раз с эффектом влияния температуры на вязкость ВУС: при увеличении скорости потока и одновременном росте температуры суспензии происходит своеобразная «компенсация», приводящая в пределе к относительному «постоянному» значению перепада давления  $\Delta P$  независимо от  $v$ . При подъеме рабочего участка влияние температуры на изменение  $\Delta P$  снижается. Кривые лежат в более узком диапазоне относительно изменения абсолютного значения  $\Delta P$  (рисунки 4б-4г), а для некоторых случаев (для  $t=50^{\circ}\text{C}$  и  $t=60^{\circ}\text{C}$  при  $\beta=15^{\circ}, 30^{\circ}, 45^{\circ}$ ) значения  $\Delta P$  равны и близки к константе.



1 —  $0^{\circ}$  2 —  $15^{\circ}$  3 —  $30^{\circ}$  4 —  $45^{\circ}$

а —  $t=30^{\circ}\text{C}$ ; б —  $t=40^{\circ}\text{C}$ ; в —  $t=50^{\circ}\text{C}$ ; г —  $t=60^{\circ}\text{C}$

**Рисунок 5.** Зависимость  $\xi$  от числа Re при различных углах  $\beta$

Значения коэффициента гидродинамического сопротивления в трубе на практике можно определить по известному соотношению, связывающему экспериментальные данные по потерям давления в трубе из-за трения со скоростным напором движущейся жидкости [2]:

$$\Delta P = \xi \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2} \quad \Rightarrow \quad \xi = \frac{2\Delta P \cdot D}{L \cdot \rho \cdot v^2},$$

где  $L$  – длина трубы, м;  $D$  – гидравлический диаметр трубы, м;  $v$  – скорость потока, м/с;  $\rho$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>.

Полученные зависимости коэффициента гидродинамического сопротивления от числа  $Re$  при различных температурах водоугольной суспензии  $t$  и углах подъема рабочего участка  $\beta$  представлены на рисунке 5.

Из рисунка 5 видно, что значительное влияние на коэффициент гидродинамического сопротивления во всем рассматриваемом диапазоне чисел  $Re$  оказывает угол подъема рабочего участка  $\beta$ . Видно сильное влияние скорости потока на коэффициент гидродинамического сопротивления. Независимо от угла наклона, начиная со значения числа  $Re > 500$ , изменения  $\xi$  минимальны.

Таким образом, можно констатировать, что независимо от рассматриваемого параметра (температура или угол подъема) графики  $\xi = f(Re)$  имеют гиперболический характер. С увеличением скорости движения суспензии значения  $\xi$  падают, асимптотически стремясь после определенного значения числа  $Re$  к некоторому минимальному значению.

### **Заключение**

Сопоставляя полученные экспериментальные значения перепадов давления и средних коэффициентов гидродинамических сопротивлений можно сделать вывод, что при малых скоростях на значения гидродинамического сопротивления сильное влияние оказывает температура суспензии. При более высоких скоростях большее влияние начинает оказывать угол подъема трубопровода. Таким образом, при выборе режимов гидротранспорта, в особенности в пределах котельного цеха, характеризующегося сложной траекторией трубопроводов, желательно избегать значительных углов подъемов трубопроводов и низких температур эксплуатации.

### **Список литературы**

1. Белых Б. Н. Состояние и перспективы использования водоугольного топлива / Б. Н. Белых, А. С. Кондратьев, А. П. Петраков // Энергетическое строительство. – 1992. – № 5. – С. 34-36.
2. Гейер В. Г., Дулин В. С., Заря А. Н. Гидравлика и гидропривод: Учеб для вузов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1991.

3. Крапчин И. П. Экономическая эффективность приготовления и использования водоугольных суспензий – экологически чистого топлива для электростанций / И. П. Крапчин, И. О. Потапенко // Уголь. – 2003. – № 11. – С. 50-52.
4. Максимов А. А. Разработка методов формирования оптимальной структуры потребления первичных энергоресурсов для производства электроэнергии: Дис. ... канд. экон. наук / РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина. – М., 2012.
5. Федотов А. И., Гильманов Р. М., Нигматуллин Р. М., Шамсутдинов Э. В., Мингалеева Г. Р. Разработка экспериментального стенда для исследования процесса транспортирования водоугольной суспензии // Труды Академэнерго. – 2010. – № 3. – С. 26-37.
6. Федотов А. И., Камалов Р. Ф., Шамсутдинов Э. В. Экспериментальный стенд по изучению процессов гидродинамики при течении водоугольной суспензии.. XVIII Туполевские Чтения. Международная молодежная научная конференция. Казань, 26–28 мая 2010. – С. 89-91.
7. Ходаков Г. С. Производство и трубопроводное транспортирование суспензионного водоугольного топлива / Г. С. Ходаков, Е. Г. Горлов, Г. С. Головин // Уголь. – 2006. – № 4. – С.22-39.
8. Ходаков Г. С. Водо-угольное топливо: перспективы трубопроводного транспортирования / Г. С. Ходаков, Е. Г. Горлов, Г. С. Головин // Уголь. – 2007. – № 6. – С. 60-63.
9. Экономическая эффективность трубопроводного гидротранспорта // Сб. науч. трудов ВНИИПИ гидротрубопровод. – М.: ВНИИПИГТ, 1986.
10. Энергетическая стратегия России на период до 2020 года. Утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 13 ноября 2009 г. № 1715-р.

**Рецензенты:**

Николаев Андрей Николаевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой, ФГБОУ ВПО «Казанский национальный исследовательский технологический университет», г. Казань.

Кирпичников Александр Петрович, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой ИСУИР ФГБОУ ВПО «Казанский национальный исследовательский технологический университет», г. Казань.