

УДК 004.89

О ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ УРАВНЕНИЯ МЕЩЕРСКОГО ДЛЯ ОПИСАНИЯ ПОТОКА НЕНЬЮТОНОВСКОЙ ЖИДКОСТИ

Д. В. Колесников

Старший преподаватель, подполковник С.Г.О.
Кафедра автоматических систем безопасности и
электроустановок

Академия пожарной безопасности имени Героев Чернобыля
ул. Оноприенко, 8, г. Черкассы, Украина, 18034

E-mail: dekol@bigmir.net

О. М. Яхно

Доктор технических наук, профессор, заведующий
кафедрой*

E-mail: o.yahno@kpi.ua

Н. В. Семинская

Кандидат технических наук*

E-mail: seminska@ukr.net

*Кафедра прикладной гидроаэромеханики и мехатроники
Национальный технический университет Украины

«Киевский политехнический институт»

пр. Победы, 37, корп. 1, к. 255, г. Киев, Украина, 03056

У роботі проведено аналіз існуючих досліджень потоків в'язкої та аномально - в'язкої рідини зі змінної по довжині масою. Також проаналізовано та експериментально підтверджено можливість використання рівняння Мещерського для опису руху в'язкої (гліцерину) та аномально - в'язкої (розчин карбонаметилцеллюлози (КМЦ)) рідини по трубах зі змінною витратою при малих числах Рейнольдса порядку 100-300

Ключові слова: трубопровід, транзитні витрати, неньютонівська рідина, дестабілізація, місцеві опори, змінна маса

В работе проведен анализ существующих исследований потоков вязких и аномально-вязких жидкостей с переменной по длине массой. Также проанализировано и экспериментально подтверждена возможность использования уравнения Мещерского для описания движения вязкой (глицерина) и аномально - вязкой (раствор карбонаметилцеллюлоза (КМЦ)) жидкостей по трубам с переменным расходом при малых числах Рейнольдса порядка 100-300

Ключевые слова: трубопровод, транзитный расход, неньютоновская жидкость, дестабилизация, местное сопротивление, переменная масса

1. Введение

Задачи, связанные с разработкой метода расчета вязких и аномально-вязких жидкостей с массой (или расходом), изменяющейся по длине, получили широкое применение во многих областях промышленности и техники.

Изменение массы жидкости вдоль ее потока приводят к существенному изменению гидродинамических характеристик скорости, напряжений и способствуют нелинейности распределения давления по длине потока.

Данные изменения и различия по сравнению со стабилизированным течением могут существенно влиять на большое количество технологических процессов, а также на процессы прогнозирования тех или иных физических явлений.

Если определить жидкость, как ту, которая протекает по каналу с площадью поперечного сечения S , то можно определить, что $m=ru\delta$, где u -средние сопротивление потока, если $m=m(x)$ (x -продольная координата), тогда

$$\frac{dm}{dx} = \rho S \frac{du}{dx} + \rho S u \frac{du}{dx},$$

$$\frac{1}{m} \frac{dm}{dx} = \frac{1}{8} \frac{du}{dx}.$$

Последняя формула указывает на то, что изменение массы по длине может приводить к дестабилизации потока, т.е. необходимости учета при расчетах силы инерции от конвективного ускорения. Соблюдение этого условия становится необходимым при проектировании различного типа оборудования. В качестве примера можно привести некоторые типы такого оборудования.

Смазочное оборудование. Существующие централизованные системы смазки представляют собой распределительные устройства с подачей масла через насадки или трубопроводы на отдельные узлы машин.

Следующим примером могут быть разного рода *распределители* для орошения различных типов верхностей.

На рис. 1 представлены схемы таких устройств (типа а, б и в), где в насадки подаётся соответствующая жидкость различными способами.

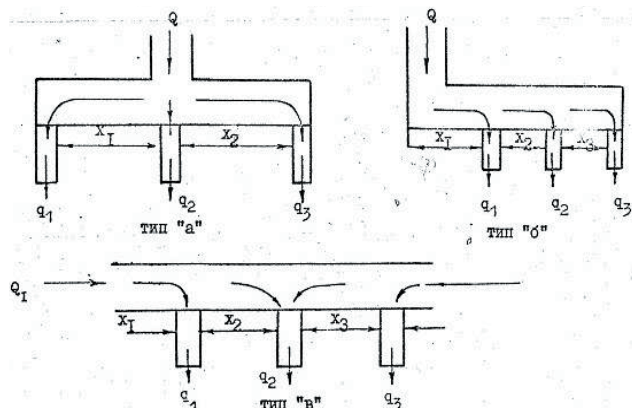


Рис. 1. Расчетная схема распределительного устройства для нанесения эмульсии в три слоя: а - с центральной подачей в распределитель; б - с боковой односторонней подачей; в - с боковой двухсторонней подачей

Широкое применение в гидродинамике потоков с переменной массой получили при решении задач (как правило для двумерных и трёхмерных потоков) о движении жидкостей в разного рода машинах и аппаратах, в которых имеет место потеря жидкости через любые уплотнения и зазоры. Примером такого рода течения в канале и изменение расхода жидкости протекающей в зазорах некоторых типов червячных машин (прессов).

Стационарные системы пожаротушения. Работа таких систем не стационарная.

Однако, в ряде случаев распределители для жидкостей могут быть в силу тех или иных причин расположены на криволинейных участках трубопроводов.

В этом случае при гидравлических расчетах необходимо учитывать кривизну потока и связанную с ней дестабилизацию течения.

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Исследованием течения вязких и аномально-вязких жидкостей в различного рода распределительных и оросительных системах занимался целый ряд исследователей [1-3, 7, 9, 10].

Особенностью решаемой проблемы являлось то, что масса жидкости по длине трубопровода изменялась за счет отбора (или добавки). В основном рассматривались потоки неньютоновской жидкости при ламинарном режиме течения.

В большинстве случаев, за основу исследований выбирались уравнения Мещерского И. В. [4], которые в преобразованиях Петрова Г. А. принимают вид:

$$\frac{d(\alpha_0 Q^2)}{2gS^2} + \frac{dp}{\rho g} + dz + Idx + \frac{\alpha_0 u_{cp} (u_{cp} - u'_q)}{g} \frac{dQ}{q} = 0,$$

где Q - расход, u_{cp} - средняя скорость, z и r - соответственно продольная координата и гидродинамическое давление, S - площадь поперечного сечения канала, I - гидравлический уклон, α_0 - коэффициент Кориолиса, u'_q - проекция скорости отсоединенного расхода на направление основного потока.

Это уравнение интегрируется при определенных граничных условиях, соответствующих физике процесса.

Так, например, если для горизонтального трубопровода с каналами отводят поток от магистрали под прямым углом, приведенное уравнение упрощаются к виду [5]:

$$\frac{\alpha_0}{gS^2} d(Q^2) + \frac{dp}{\rho g} = 0.$$

Физическое и математическое моделирование потока с переменной массой позволило авторам работ разработать рекомендации относительно расчета коэффициента гидравлического сопротивления λ [1]:

$$\lambda = 2,111 Re^{-0,40}.$$

Нестабилизированные процессы водопроводных систем, орошения, систем, используемых в пожарной технике, как правило определяют их работу и надежность в условиях эксплуатации. Однако такие процессы могут быть причиной дестабилизации работы оборудования и поэтому проблемы обоснования расчетных параметров системы, которые обеспечивают надежность работы *актуальны*. К нестабилизированным процессам движения жидкости в пожарной технике относят процессы в различных типах распределительных и оросительных напорных трубопроводах, где движение жидкости происходит с переменной по длине массой.

Одним из требований к этим системам является требование равномерности орошения поверхностей с одинаковыми затратами жидкости на единицу поверхности с учетом требований относительно энергосбережения.

В связи с этим, одной из перворазрядных задач в этом направлении является задача прогнозирования работы подобной оросительной системы при заданных ее геометрических характеристиках, кинематических и динамических характеристиках потока.

3. Цель исследования

Целью исследования является обобщение методов расчета нестабилизированного движения вязких жидкостей в напорных трубопроводах и системах с переменной по длине массой жидкости.

4. Исследования

Так как рассматриваемая жидкость является неньютоновской, то во всех приведенных исследованиях предполагалось, что дестабилизованное

течение, возникающие в зоне насадка отводящей части потока, является незначительным и им можно пренебречь.

Вместе с тем, возникает вопрос о возможности пренебрежения влиянием сил инерции от конвективного ускорения, если жидкость проявляет аномалию вязкости.

Изменения расхода на участках магистрального трубопровода (рис. 2) приводит к изменению градиента скорости $\dot{\gamma} = \frac{4Q}{\pi R^3}$, а следовательно и изменению вязкости, так как для ряда неньютоновских жидкостей $\mu = \mu(\dot{\gamma})$.

Таким образом, наличие аномалии вязкости жидкости приводит к дестабилизации потока по двум причинам:

- возмущение потока за счет наличия отбора жидкости;
- изменения градиента скорости.

На рис. 2 показана картина наличия возмущений в потоке за счет наличия отбора в жидкости через насадок.

Отбор жидкости из магистрали представляет собой определенный вид местного сопротивления, расчет потерь в котором может осуществляться по типу тройника [6].

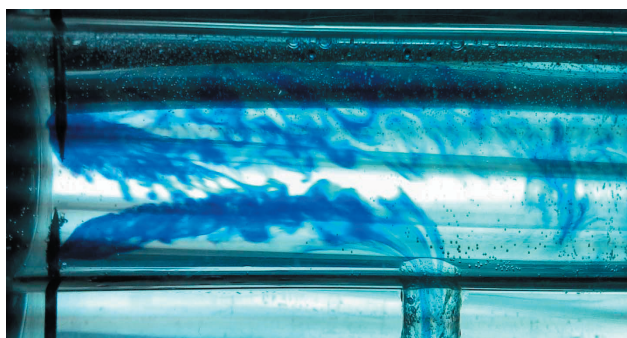


Рис. 2. Картина течения жидкости при наличии отбора жидкости (транзитного расхода)

В табл. 1 показано, в какой мере может изменяться местное сопротивление на данном участке (отбора жидкости) в зависимости от соотношения транзитной скорости u_{cp} к скорости отбора жидкости u_q [6, 8].

Таблица 1

Изменение местного сопротивления на участке отбора жидкости в зависимости от соотношения транзитной скорости u_{cp} к скорости отбора жидкости u_q

u_{cp} / u_q	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0,0
$\xi_{отбора}$	0,28	0,22	0,17	0,13	0,09	0,06	0,03	0,01	0,001	0

Данные величины являются так же функциями от угла установки насадка относительно оси магистрального трубопровода по данным работы [6] эта зависимость имеет вид представленный на рис. 3.

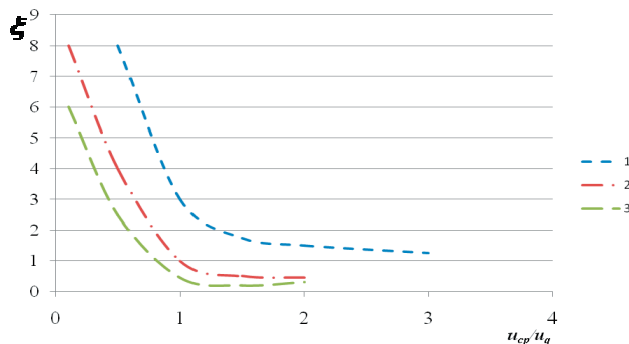


Рис. 3. Зависимость местного сопротивления от соотношения транзитной скорости к скорости отбора жидкости $\xi = f(\frac{u_{cp}}{u_q})$ для случаев: 1 - насадка перпендикулярна расположена к оси трубопровода; 2 - насадка расположена под углом $\alpha = 60^\circ$ к оси трубопровода; 3 - насадка расположена под углом $\alpha = 45^\circ$ к оси трубопровода

Как видно из рис. 2, наличие зоны отбора жидкости приводит к изменению траектории движения частиц жидкости, а следовательно и деформации эпюры скоростей. Если насадки расположены на достаточно близких расстояниях друг от друга, то влияние их между собой может быть существенным, а следовательно возникнет необходимость расчета длины гидродинамического начального участка за каждой из зон отбора жидкости. Вместе с тем, при достаточно больших расстояниях между насадками $l \gg l_{н.у.}$, достаточно будет вводить лишь небольшие коррективы в формулы для расчета гидравлических потерь энергии, например, на основе данных, приведенных в работе [6].

Если предположить, что течение в рассматриваемом трубопроводе ламинарное, а жидкость описывается законом Освальда де Виля, то при условии $u'_q = 0$ (т.е. отбор ведется под прямым углом к оси магистрали) уравнение Мещерского может быть записано в виде:

$$\frac{(4n+2)(5n+3)}{3(3n+1)^2 g S^2} d(Q^2) + \frac{dp}{gp} + d \left\{ \frac{4Kl}{\rho g d} \left[\frac{8Q(3n+1)}{\pi d^3 n} \right]^n \right\} = 0, \quad (1)$$

где n - индекс течения; K - консистентная постоянная.

При установлении насадка следует воспользоваться информацией о коэффициенте местных потерь ξ или формулой для расчета коэффициента расхода.

На основании приведенного уравнения получим выражения характеризующие изменение давления по длине для двух случаев:

- отсутствие транзитного расхода ($Q_T = 0$)

$$\frac{p_x - p_0}{\rho g} = - \frac{16(4n+2)(5n+3)}{\pi^2 g d^4} Q_0^2 \left(2 - \frac{z}{2}\right) - \frac{4Kl}{\rho g d} \left[\frac{8Q_0(3n+1)}{\pi d^3 n} \right]^n \frac{1}{n+1} \left[1 - \left(1 - \frac{z}{l}\right)^{n+1} \right] \quad (2)$$

при условии что $Q_x = Q_0 \left(1 - \frac{z}{l}\right)$;

- при наличии транзитного расхода $Q_T \neq 0$

$$\frac{p_x - p_0}{\rho g} = -\frac{16(4n+2)(5n+3)}{\pi^2 g d^4} \times$$

$$\times \left[(Q_0 - Q_T)^2 \frac{z^2}{l^2} - 2Q_0(Q_0 - Q_T) \frac{z}{l} \right] +$$

$$+ \frac{4Kl}{\rho g d(n+1)} \frac{8(3n+1)}{\pi d^3 n} \times$$

$$\times \left[Q_0 - (Q_0 - Q_T) \frac{z}{l} \right]^{n+1} - Q_0^{n+1}$$

при условии что $Q_x = Q_0 - (Q_0 - Q_T) \frac{z}{l}$.

Решение представленных уравнений, совместно с уравнением определяющим коэффициент расхода через насадок и позволяет произвести расчет площадей поперечного сечений в насадках в зависимости от реологических свойств рассматриваемой жидкости (т.е. величины K и n).

Если число насадок равно m , для каждого из них S_i можно получить (случай когда $Q_T = 0$)

$$S_i = Q_0 \frac{1}{m \sqrt{\beta_0}}, \tag{4}$$

где β_0 - некая величина включающая в себя значения K , n , d , Q_0 , z , l , то есть

$$\beta_0 = 2\mu^2 g \left\{ \frac{p_0}{\rho g} - \frac{16(4n+2)(5n+3)Q^2 z}{\pi^2 g d^4} \left(2 - \frac{x}{2} \right) - \frac{4Kl}{\rho g Q} \left[\frac{8Q_0(3n+1)}{\pi d^3 n} \right]^n \frac{1}{n+1} \left[1 - \left(1 - \frac{x}{l} \right)^{n+1} \right] \right\},$$

где μ - коэффициент расхода через насадок определяемый из формулы

$$Q_i = \mu_i S_i \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}.$$

Проверка приведенных соотношений осуществлялась нами на экспериментальном стенде, где магистральный трубопровод имел диаметр 27,2 мм (длина 5 м), в котором на расстоянии 0,7 м друг от друга были установлены насадки диаметром от 5...6 мм. В качестве исследуемых жидкостей использовались как водный раствор глицерина (неньютоновская жидкость) так и растворы карбонаметилцеллюлоза КМЦ (2%, 4%).

Глицерин имел плотность 112 кг/м³ (при температуре $T=23,5^{\circ}C$), а водный раствор КМЦ соответствовал 1200 кг/м³ (при температуре $T=20^{\circ}C$). Результаты опытов представлены на рис.4. Анализ приведенных результатов показал, что при малых числах Рейнольдса ($Re \ll 2000$) градиент давления по длине трубопровода близок к константе и гидравлическое сопротивление с определенной степенью достоверности (5-7%) определяется аналогично случаю, когда отбор жидкости отсутствует, т.е. при числах Рейнольдса порядка 100-300 существенное влияние дестабилизации потока отсутствует. Таким образом, применение урав-

нения Мещерского в этом случае правомерно. Вместе с тем, несколько иная картина течения наблюдается при числах Рейнольдса $Re \gg 1200$ и особенно при турбулентном режиме течения.

В то же время, расход через насадок нелинейно зависит от перепада давления (рис. 4).

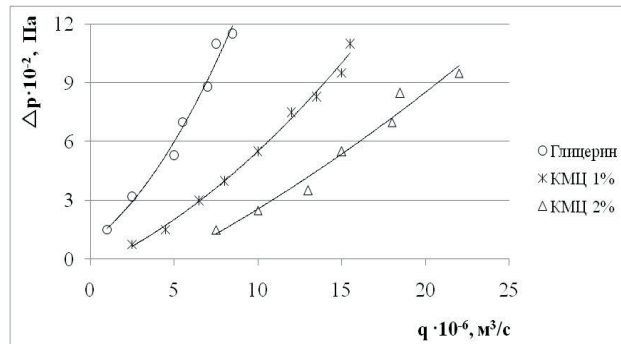


Рис. 4. Зависимость перепада давления от расхода $\Delta p = f(q)$, для разных видов жидкости

5. Выводы

Проведенный в работе анализ существующих исследований потоков вязкой жидкости с переменной по длине массой показал, что большинство авторов проводили изучение гидродинамики при условиях стабилизированного течения, в основном, ньютоновских жидкостей. В качестве исходных использовались видоизмененные уравнения Мещерского с заданным законом изменения массы. Движение рассматривалось в прямых трубопроводах, в большинстве случаев жидкость представляла собой однородную среду, описываемое реологическим законом Ньютона. Вместе с тем развитие промышленности, техники и технологий пожаротушения, все чаще и чаще ставят задачи по созданию стационарных установок с использованием жидких смесей полимерных добавок разного типа, добавление которых, может способствовать появлению аномалий вязкости, кроме того, довольно часто такие трубопроводы в зависимости от технологических целей могут быть криволинейными, кольцевыми, выпуклыми и т.д. Такие особенности и условия изменения средней скорости потока по длине приводят к дестабилизации течения, то есть к существенному влиянию сил инерции от конвективного ускорения. Эти силы могут быть разными по величине в зависимости от массы жидкости которая отбирается по длине. Учет этих факторов может привести к существенной корректировке методов расчета и проектирования стационарных установок.

В приведенной работе были получены соотношения (1-4), проверка которых на экспериментальном стенде, позволило установить, что при числах Рейнольдса порядка 100-300 существенное влияние дестабилизации потока отсутствует.

Таким образом, применение уравнения Мещерского в этом случае правомерно. В качестве исследуемых жидкостей использовались водный раствор глицерина (неньютоновская жидкость) и растворы карбонаметилцеллюлоза КМЦ (2%, 4%).

Литература

1. Федорец, А. А. Определение коэффициента гидравлического трения в трубопроводах при отсоединении расхода [Текст] / А. А. Федорец, З. Р. Маланчук // Гидравлика и гидротехника. - 1980. - Вып. 31. - С. 58-62.
2. Кравчук, А. М. Движение жидкости в трубопроводах с отсоединенным расходом вдоль пути [Текст] / А. М. Кравчук // Автореферат...кандид. техн. наук. К. - 1985.- 23 с.
3. Животовский, Б. А. К вопросу о расчете трубопроводов с непрерывно меняющимся расходом по длине [Текст] / Б.А. Животовский // Труды университета Дружбы народов им. П. Лумумбы. - 1973. - Вып. 65. - С. 132 - 137.
4. Мещерский И.В. Уравнение движения точки переменной массы в общем случае [Текст] / И.В. Мещерский // М.: Государственное издательство по строительству и архитектуре. - 1952.
5. Henruk Walden, Jezzy Stsiak. Mechenika ciecy i garow b inzynierii sanitarnej [Текст] / Arkdy, Warszawa. - 1971. - с. 554
6. Яхно О.М., Кривошеев В.С., Матиiega В.М. Гидродинамический начальный участок [Текст], Черновці, "Зелена Буковина"-2004. - 200с.
7. Повх И.Л. Техническая гидромеханика [Текст], М.: Машиностроение, -1976. - 504 с.
8. Каминер А.А., Яхно О.М. Гидромеханика в инженерной практике [Текст], Техника. - 1987. - 175 с.
9. Яхно О.М., Дубовицкий В.Ф. Основы реологии полимеров [Текст] Издательское объединение «Вища школа» - 1976.- 188 с.
10. Торнер, Р.В. Основные процессы переработки полимеров (теория и методы расчета) [Текст] / Р.В. Торнер.- М.: Химия. - 1972.- 456 с.

Ми представляємо конструкцію багатофункціонального вихрового апарата із зустрічними закрученими потоками, яка може бути використана для проведення різних фізико-механічних процесів в умовах активних гідродинамічних режимів

Ключові слова: вихровий апарат із зустрічними закрученими потоками (ВАЗЗП), активний гідродинамічний режим, сепарація

Мы представляем конструкцию многофункционального вихревого аппарата со встречными закрученными потоками, которая может быть использована для проведения различных физико-механических процессов в условиях активных гидродинамических режимов

Ключевые слова: вихревой аппарат со встречными закрученными потоками (ВАЗЗП), активный гидродинамический режим, сепарація

УДК 621.928.37

ИССЛЕДОВАНИЕ, РАЗРАБОТКА И КОНСТРУКТИВНОЕ ОФОРМЛЕНИЕ МНОГО- ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ВИХРЕВЫХ АППАРАТОВ

Р. В. Галич

Инженер по наладке и испытаниям технологий
Частное акционерное общество «Северодонецкий
ОРГХИМ»

Гвардейский пр-т, 32, г. Северодонецк, Украина,
93409

E-mail : galitch@bk.ru

1. Введение

Первые серьёзные публикации по вихревым аппаратам датированы 1963 годом, когда немецкие исследователи, проводившие опыты с тонкодисперсными пылями в закрученных (вихревых) потоках, отметили эффект осаждения частиц на стенки аппарата [1-3]. После патентования и последующих продолжительных теоретических, экспериментальных, промышленных исследований и системного анализа полученных результатов, появилась первая конструкция аппарата со вторичными струями, которая стала прототипом для современных конструкций вихревых аппаратов

со встречными закрученными потоками (ВАЗЗП), предназначенных для проведения процесса сепарации частиц (пылеулавливания). В последующем теоретическими исследованиями и промышленным внедрением пылеуловителей ВАЗЗП занимались российский учёный д.т.н., проф. Гудим Л. И. [4-6] под руководством академика Сажина Б. С. (Московский государственный университет дизайна и технологий), а также украинский учёный д.т.н., проф. Якуба А. Р. [7] (Сумский национальный аграрный университет), результаты работ которых позволили в современной технике пылеулавливания иметь широкий типоразмерный ряд и общую инженерную методику выбора и