

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ГАЗОЖИДКОСТНОЙ СТРУКТУРЫ ПОТОКА В СИСТЕМЕ ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ ЖИДКОСТИ ПОД ВАКУУМОМ

Виктор Нездойминов, Виталий Рожков, Надежда Григоренко, Дмитрий Заворотный

Донбасская национальная академия строительства и архитектуры  
Адрес: Украина, г. Макеевка, ул. Державина 2  
E-mail: [vk\\_dgasa@ukr.net](mailto:vk_dgasa@ukr.net), [vitolione@ukr.net](mailto:vitolione@ukr.net), [n\\_grig86@mail.ru](mailto:n_grig86@mail.ru), [dmzavor@mail.ru](mailto:dmzavor@mail.ru)

**Аннотация.** Рассмотрен вопрос движения двухфазного потока жидкость/газ на участке сети системы вакуумной канализации, предложена модель работы и расчет потерь давления по длине одного участка с учетом гидродинамических особенностей. Уточнен расчет градиента давления при расслоенной структуре движения газожидкостной смеси.

**Ключевые слова:** двухфазный поток, структура потока, потери давления, вакуумная канализация

### ВВЕДЕНИЕ

Во многих странах мира доля населения, проживающего в не оснащенных системами канализации поселениях, составляет от 5 до 20 % [6]. В последние годы наблюдается повышенное внимание к вопросам строительства и эксплуатации канализации в малых населенных пунктах. Многие международные конференции в Европе были посвящены данной теме - поиску оптимальных решений по сбору и очистке сточных вод малых населенных пунктов [3, 4, 6]. Большой интерес к этой теме обусловлен тем, что, несмотря на небольшую долю населения, проживающего в сельских поселениях, не подключенных к централизованной канализации, масштабы загрязнения окружающей природной среды неочищенными сточными водами по-прежнему очень велики. При проектировании, строительстве и эксплуатации систем канализации в малых населенных пунктах на практике возникает ряд экономических, технических, гигиенических и экологических проблем.

К малой канализации относятся сети и сооружения, предназначенные для своевременного сбора, быстрого отведения (транспортирования) и очистки бытовых и близких к ним по своему составу производственных сточных вод в количестве до 1400 м<sup>3</sup>/сутки. Норма водоотведения бытовых сточных вод в малых населенных пунктах при наличии благоустроенных домов, а именно с централизованным водоснабжением, обычно от 125 до 160 л/сутки на одного человека. В неблагоустроенных районах нормы водоотведения принимаются из расчета от 25 до 50 л/сутки на одного жителя за счет сброса в канализацию сточных вод сливными станциями и коммунально-бытовыми предприятиями [8, 18].

На сегодняшний день отсутствие коммунальных сетей и сооружений для сбора и очистки сточных вод характерно для малых населенных пунктов, а также для части территорий

малоэтажного жилищного строительства больших городов. По официальным данным Министерства регионального развития, строительства и жилищно-коммунального хозяйства Украины, централизованными системами водоотведения обеспечено всего лишь 5,6% общей их численности.

Для решения этой проблемы есть несколько подходов – это создание групповых систем водоотведения, обслуживающих группы населенных мест, с крупными сооружениями для очистки сточной воды или устройство локальных систем водоотведения малой производительности, обслуживающих отдельные населенные пункты, группы зданий, отдельные коммунальные сооружения, с малыми установками для обработки стоков.

Для транспортирования малых расходов сточных вод наиболее рационально и экономически оправдано использование вакуумной канализации. Ее применение обосновано для населенных пунктов с малой плотностью заселения, а также для объектов временного пользования (лагеря, пансионаты, кемпинги), санитарных зон водоисточников. Причем при проектировании и строительстве данной системы не возникает проблем с высоким уровнем грунтовых вод и сложных грунтовых условий. Более подробно об использовании вакуумной системы канализации рассмотрено авторами в [13].

Данная система уже получила широкое распространение в мире, благодаря ряду преимуществ перед самотечной канализацией. Но, на сегодняшний день, сдерживающим фактором ее повсеместного распространения является отсутствие алгоритма расчета, который имеет под собой теоретическую базу, а не интуитивные методы. Сложность создания расчетных формул заключается в особенностях транспортирования сточных вод под действием вакуума, а именно – транспортировку двухфазной среды «жидкость-газ». В Украине систему вакуумной канализации представляют несколько зарубежных представителей, наиболее

известной является немецкая фирма Roediger Vacuum [18].

### АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ, МАТЕРИАЛОВ, МЕТОДОВ

Изучению движения двухфазных потоков в вертикальных и горизонтальных трубопроводах в последние годы уделено большое внимание [1, 2, 5, 15-17, 19, 20]. Это объясняется значимостью данной проблемы во многих областях науки и техники, в том числе в системах вакуумного транспортирования сточных вод.

Описание внутрифазных процессов и взаимодействий в гетерогенных средах довольно сложно. Поэтому, для получения приемлемых результатов для практического применения зачастую пользуются различными допущениями и упрощениями. Исследования в области движения газожидкостных потоков в трубопроводах проводились многими отечественными и зарубежными учеными, а именно: Армандом А.А., Кутателадзе С.С., Нигматулиным Р.И., Г. Уоллисом, Д. Верслоисом, Крыловым А.П., Мамаевым В.А., Одишарией Г.Э., Д. Чисхолмом, Дж. Хьюиттом, Лабунцовым Д.А. И. Тейтелом, А. Даклером и др.

Авторами статьи уже была сделана попытка создания математической модели и расчета системы вакуумной канализации [14]. В данной работе более детально рассматривается модель движения водовоздушной смеси в системе вакуумной канализации и конкретно участок с расслоенной структурой движения.

В работах [1, 5, 10-12, 15, 16, 19, 20] теоретически и экспериментально изучены основные гидродинамические особенности газожидкостных потоков: типы течения, газосодержание, потери давления и т.д. Но все эти исследования и полученные параметры имеют ощутимую погрешность, связанную с большим количеством переменных, характеризующих двухфазное течение. Вот некоторые из этих переменных: массовый расход, плотности и вязкости жидкости и газа, поверхностное натяжение, шероховатость внутренней поверхности труб, наклон трубы к горизонту. Для понимания сути двухфазного движения представление о структуре потока (режиме движения) имеет большое значение, т.к. существенно влияет на определение потерь давления на отдельном расчетном участке. Изучению структуры потока и ее влияния на градиент давления в трубопроводе также посвящено множество научных трудов [1, 10, 20]. Установлено, что структура двухфазного потока существенно зависит от расположения трубопровода относительно горизонта и направления движения фаз [5].

### ЦЕЛЬ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

Целью работы является математическое описание газожидкостной структуры потока и уточнение расчетной зависимости при транспортировании жидкости под действием вакуума.

Задачами работы является, определение расчетных параметров двухфазных потоков и потерь давления в системе транспортирования жидкости под действием вакуума.

### ОСНОВНОЙ РАЗДЕЛ

Основной процесс, протекающий в системе вакуумной канализации - это движение сточной жидкости в трубе с наклоном к горизонту не более  $10^\circ$  под действием вакуума и расширения воздуха, забираемого из атмосферы с помощью самозадействующих клапанов специальной конструкции [7]. Поэтому для описания параметров движения сточных вод в данной системе является важным изучение двухфазных потоков типа жидкость-газ.

Движение газожидкостной смеси в системе вакуумной канализации начинается от клапана или водо-воздуховпускного устройства (ВВВУ) до первого перепадного колена, в котором движение останавливается до повторного открытия ВВВУ. При этом, происходит частичное накопление сточной жидкости в перепадном колене (рис. 1).

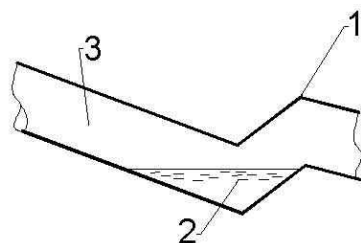


Рис. 1. Элемент вакуумного трубопровода с перепадным коленом при закрытом ВВВУ  
1 – перепадное колено; 2 – накопление сточной жидкости

Fig. 1. Element of vacuum pipe with the closed valve  
1 – dropping elbow; 2 – accumulation of wastewater

При повторном открытии ВВВУ в систему попадает новая порция сточной жидкости и воздуха, движение водовоздушной смеси на участке трубопровода продолжится, при этом накопленный объем жидкости (2) под действием расширившегося воздуха переходит на следующий отрезок сети, ограниченный перепадными коленами. Следовательно, можно сказать, что движение газожидкостной смеси от одного перепадного колена к последующему, вплоть до вакуумной

станции, повторяется, а, значит, расчет системы можно свести к расчету отрезка сети, ограниченному перепадным коленом и началом следующего перепада.

Основным параметром, предопределяющим эффективную работу системы и выбор оборудования при вакуумном транспортировании, является величина создаваемого в сети вакуума, который в свою очередь зависит от потерь энергии на участках трубопровода. Это значит, что расчет системы в первую очередь должен быть направлен на учет всех потерь энергии в системе, в результате чего можно определить расчетную величину вакуумметрического давления.

При расчете систем для транспортировки двухфазных смесей очень важно правильно определить плотность смеси, которая в свою очередь зависит от газосодержания. В динамике газожидкостного потока обычно различают три параметра, относящихся к газосодержанию: истинное объемное газосодержание, объемное расходное газосодержание и массовое расходное газосодержание [1, 11, 15, 17, 20].

Истинным объемным газосодержанием,  $\varphi$ , называется усредненное по времени текущее объемное содержание газа:

$$\varphi = \frac{dV_G}{dV},$$

$dV_G$  – усредненный по времени объем газа в элементарном объеме  $dV$ . Истинное объемное газосодержание также может быть выражено через приведенные и истинные скорости газа или жидкости:

$$\varphi = \frac{v_G^{np}}{v_G} = 1 - \frac{v_L^{np}}{v_L},$$

где  $v_G^{np}$ ,  $v_L^{np}$  – приведенные скорости газа и жидкости (отношение среднего по времени объемного расхода данной фазы через поперечное сечение потока к полной площади этого сечения), м/с;

$v_G$ ,  $v_L$  – истинные скорости газа и жидкости соответственно (отношение среднего по времени

объемного расхода данной фазы к площади сечения потока, занятой только этой фазой), м/с.

Объемное расходное газосодержание  $\varepsilon$  определяется через объемные расходы газа и водовоздушной смеси.

$$\varepsilon = \frac{dQ_G}{dQ},$$

где  $dQ_G$  – средний по времени объемный расход газа через элементарную площадку, м<sup>3</sup>/с;

$dQ$  – средний по времени объемный расход водовоздушной смеси через элементарную площадку, м<sup>3</sup>/с.

В некоторых случаях (в гомогенных потоках) истинное объемное  $\varphi$  и объемное расходное газосодержание  $\varepsilon$  могут считаться равными [10 - 12]. Поток не является гомогенным при различных скоростях составляющих его фаз, следовательно, газосодержания  $\varphi$  и  $\varepsilon$  не совпадают.

Для систем вакуумной канализации значение объемного расходного газосодержания  $\varepsilon$  и скорости водовоздушной смеси могут быть получены экспериментально.

В лабораторных условиях смонтирована экспериментальная установка для получения основных гидropневматических параметров системы, которая выполнена из пластмассовых труб длиной 26 м, имеющих уклон в сторону движения перекачиваемой жидкости и перепадные колена, выполненное из прозрачного гибкого шланга. Вода забирается из мерной емкости в ресивер, где вакуум-насосом создается некоторое вакуумметрическое давление. После заполнения ресивера жидкость перекачивается обратно в мерную емкость центробежным насосом. В начале трубы и на ресивере установлены вакуумметры для измерения создаваемого вакуума и потерь давления в системе. Подача жидкости и атмосферного воздуха осуществляется с помощью ВВУ. При проведении экспериментов измерялись показания вакуумметров, объем забираемых жидкости и воздуха, время прохождения водовоздушной смеси по всей длине экспериментального участка.

Схематическое изображение лабораторной установки представлено на рисунке 2.

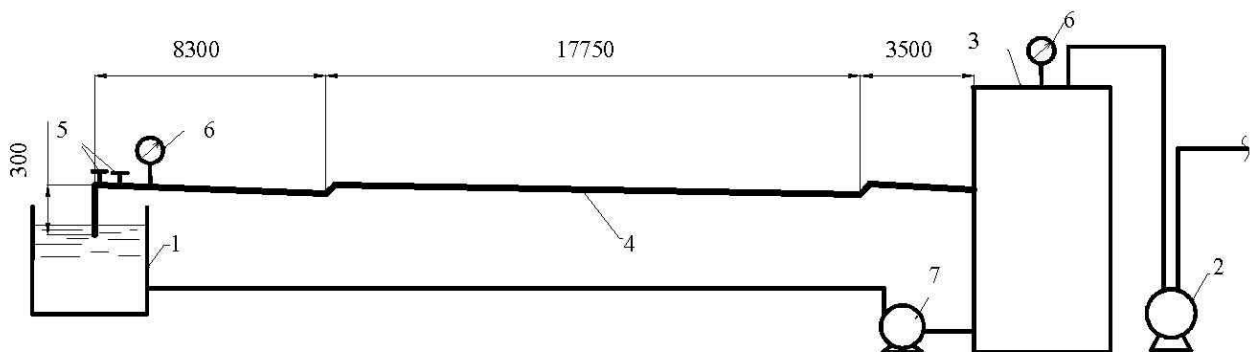


Рис. 2. Схема лабораторной установки, работающей по принципу вакуумной системы.

1 – мерная емкость; 2 – вакуум-насос; 3 – ресивер; 4 – пластмассовый трубопровод, 5 – ВВВУ; 6 – вакуумметр; 7 – циркуляционный насос

Fig. 2. Scheme of the laboratory setup that works on the principle of vacuum system  
1 - dimensional tank 2 - vacuum pump; 3 – receiver; 4 – plastic pipe; 5 – WACI (item for coming of water-air), 6 - vacuum gauge; 7 - circulation pump

Экспериментальное исследование транспортирования жидкости под вакуумметрическим давлением проводилось с использованием трубопроводов диаметром 20 мм и 50 мм. Определено, что максимальная скорость водовоздушной смеси  $v_s$  достигается при объемном расходе газосодержания  $\varepsilon = 0,71-0,74$ . При таком значении соотношения газ-жидкость  $Q_G/Q_L = 0,3-0,4$  [7]. Полученная в лабораторных условиях зависимость скорости водовоздушной смеси и газосодержания  $\varepsilon$  при создаваемом отрицательном давлении  $P = 4 \text{ м.вод.ст.}$  представлена на рис. 3.

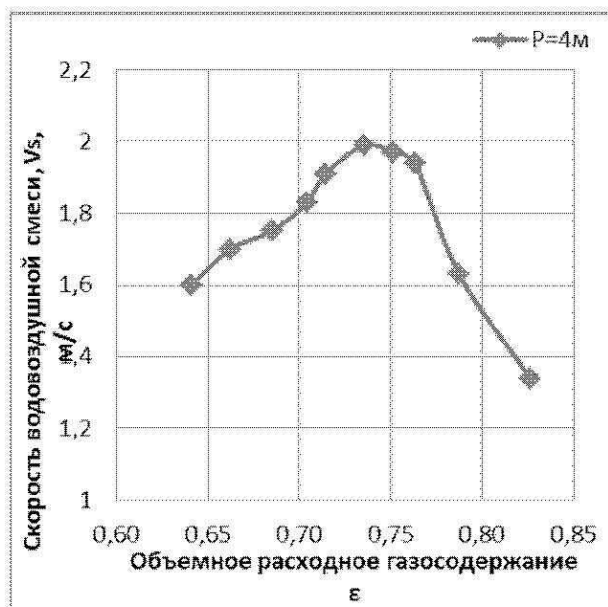


Рис. 3. Зависимость скорости водовоздушной смеси  $v_s$  от газосодержания  $\varepsilon$  при вакуумметрическом давлении  $P = 4 \text{ м.вод.ст.}$

Fig. 3. The velocity of gas-water mixture  $v_s$  in dependence from the gas content  $\varepsilon$  (negative pressure  $P = 4 \text{ m}$ )

На определение плотности смеси также влияет распределение фаз по длине трубопровода, что в свою очередь зависит от структуры движения. Для определения режима движения газожидкостной смеси под действием вакуума на лабораторной установке был проведен ряд экспериментов. Отличием лабораторной модели для проведения испытаний на определение структуры движения от лабораторной модели описанной выше является наличие прозрачных вставок из стеклянных трубок, в которых наблюдался и фиксировался режим движения двухфазного потока. В результате

испытаний было определено, что режим движения в системе изменяется по длине трубопровода, что, вероятно, связано с особенностью устройства системы вакуумной канализации. Рассматриваемый участок трубопровода с размеченными диапазонами изменения структуры потока представлен на рисунке 4.

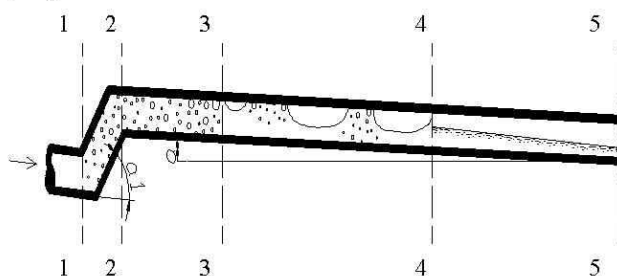


Рис. 4. Движение газожидкостной смеси на участке вакуумного трубопровода. Сечения 1-2 и 2-3 – пузырьковая структура, сечение 3-4 – снарядная структура, сечение 4-5 – расслоенная структура движения.

Fig. 4. The movement of gas-liquid mixture in the pipeline of vacuum network. Crosssections 1-2 and 2-3 – DispersedBubbleFlow, 3-4 – SlugFlow, 4-5 – StratifiedFlow

Как уже было отмечено, вакуумный трубопровод является нисходящим трубопроводом, т.е. расположен под углом к горизонту. Главное отличие горизонтальных и наклонных к горизонту каналов – в несимметричности гравитационных сил относительно оси канала. Это вызывает смещение газовой фазы к верхней образующей, а жидкой – к нижней. Поэтому, угол наклона к горизонту также является важным фактором при расчете транспортирования двухфазных смесей.

На основании вышесказанного, расчет системы необходимо выполнять для каждого участка, на котором происходит изменение структуры движения, отдельно, с учетом гидропневматических параметров, которые влияют на величину градиента давления именно на этом участке.

Математическое моделирование транспортирования газожидкостной смеси под действием вакуума уже описывалось авторами в [14]. Модель работы выполнена для одного участка сети в период времени от открытия ВВВУ до прохождения газожидкостной смесью расстояния, равного длине участка.

$$\Delta P = \int_0^{x_{1-2}} \left( \frac{dP}{dx} \right) \cdot x_{1-2} + \int_{x_{1-2}}^{x_{2-3}} \left( \frac{dP}{dx} \right) \cdot x_{2-3} + \int_{x_{3-i}}^{x_{i-j}} \left( \frac{dP}{dx} \right) \cdot x_{i-j}, \text{ [Па]}$$

При моделировании процессов вакуумного транспортирования водовоздушной смеси были приняты следующие допущения:

- значение скоростей движения смеси жидкость-газ, газа и жидкости принимались равными;
- каждая фаза движения сменяет одна другую последовательно,
- воздух не вырывается перед жидкостью до момента изменения структуры потока и движение происходит плавно, сменяясь одно другим.

Рассмотрим каждый участок в отдельности. Определим удельные потери давления на участке 1-2:

$$\left( \frac{dP}{dx} \right)_{1-2} = \rho_u \left( g \cdot \sin \alpha_1 + 2 \frac{f_s}{d} v_s^2 \right), \text{ [Па/м]}$$

где  $\rho_u$  – плотность водовоздушной смеси кг/м<sup>3</sup>, рассчитывается в зависимости от объемного расходного газосодержания  $\epsilon$ .

$v_s$  – средняя скорость движения водовоздушной смеси, м/с,

$\sin \alpha_1$  – угол наклона трубопровода к горизонту; на участке 1-2, °,

$f_s$  – коэффициент Фаннинга водовоздушной смеси, определяется по эмпирическим зависимостям в зависимости от числа Рейнольдса[2].

$d$  – диаметр трубопровода, м.

Удельные потери давления на участке 2-3 представляют собой ту же зависимость, но с учетом изменения угла наклона трубопровода к горизонту:

$$\left( \frac{dP}{dx} \right)_{2-3} = \rho_u \left( -g \cdot \sin \alpha + 2 \frac{f_s}{d} v_s^2 \right), \text{ [Па/м]}$$

$\sin \alpha$  – угол наклона трубопровода к горизонту на участке 2-3, °;

Удельные потери давления на участке 3-4 представляют собой более сложную зависимость. Это обусловлено тем, что структура движения меняется на снарядную, которую упрощенно можно представить как расслоенную на участках образования пузырьков и пузырьковую в пространстве между ними. Условно структура потока с разделением ее на участки с пузырьковой и расслоенной структурой представлены на рисунке 4.

Формула, описывающая зависимость потерь давления представлена ниже:

$$\left( \frac{dP}{dx} \right)_{3-4} = -\rho_u \cdot g \cdot \sin \alpha + \frac{2f_s}{d} \rho_s \cdot v_s^2 \frac{L_s}{L_u} + \frac{4}{\pi d^2 L_u} \left( \frac{f_G \rho_G v_G^2}{2} \overline{S_G} + \frac{f_L \rho_L v_L^2}{2} \overline{S_L} \right), \text{ [Па/м]}$$

Общие потери давления в системе ( $\Delta P$ ) определяются для каждого участка, на котором происходит изменение структуры движения, отдельно, с учетом гидродинамических параметров, которые влияют на величину градиента давления  $\left( \frac{dP}{dx} \right)$  именно на этом участке в зависимости от его длины  $x$ :

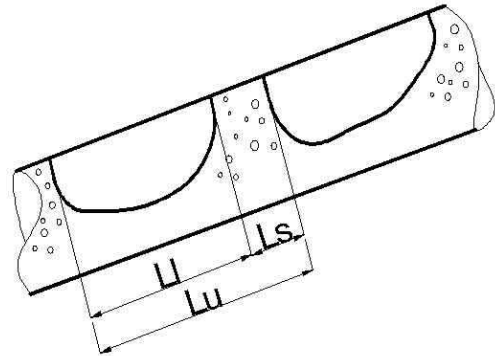


Рис. 5. Фрагмент участка 3-4 со снарядной структурой потока

Fig. 5. Fragment of area 3-4 with a slug flow structure

$\rho_s$  – плотность водовоздушной смеси, рассчитывается в зависимости от истинного объемного газосодержания  $\phi$ ,

$v_G = v_L$  – средняя скорость движения газа и воды соответственно, для гомогенного потока принимается равным скорости движения водовоздушной смеси  $v_s$ ,

$f_G, f_L$  – коэффициент Фаннинга для газа и жидкости, определяется в зависимости от числа Рейнольдса [2],

$\frac{L_s}{L_u}$  –отношение длины, занимаемой жидкостью, к общей длине рассматриваемого участка,

$\frac{L_g}{L_u}$  –отношение длины, занимаемой водовоздушной смесью, к общей длине рассматриваемого участка,

$\overline{S_G}, \overline{S_L}$  – смоченный периметр газа и жидкости соответственно, берется усредненное значение по длине рассматриваемого участка.

Расчет производится с учетом критической глубины  $h_{кр}$ , определенной исходя из уравнения удельной энергии сечения [9].

$$\left(\frac{dP}{dx}\right)_{4-5} = -\rho_s \cdot g \cdot \sin \alpha + \frac{4}{\pi d^2 L_u} \left( \frac{f_G \cdot \rho_G \cdot v_G^2}{2} \overline{S_G} + \frac{f_L \cdot \rho_L \cdot v_L^2}{2} \overline{S_L} \right), \text{ [Па/м]}$$

Допущения, которые были приняты при моделировании данной системы, могут считаться верными для гомогенного потока. Однако, расслоенный режим движения, наблюдаемый на участке 4-5, независимо от характера разделения течения, к гомогенным потокам не относится. Следовательно, на данный участок допущение о равенстве скоростей  $v_G = v_L$  не распространяется.

Метод определения скоростей движения газа и жидкости изначально зависит от характера разделения течения.

Если скорости фаз не превышают скорости самотечного движения жидкости в тех же условиях – разделение считается полным. Для данной структуры потока разделение может быть устойчивым и неустойчивым. Устойчивая разделенная структура наблюдается на постоянно нисходящих участках, а неустойчивая – в случае смены нисходящих и восходящих участков [12]. В трубопроводе, транспортирующем жидкость под действием вакуумметрического давления, участок 4-5 представляет собой постоянно наклонный трубопровод, что свидетельствует об устойчивом характере расслоения потока.

В случае, когда скорость газовой фазы превышает скорость жидкости в самотечном режиме, на поверхности разделения фаз образуются волны. Такую структуру потока называют расслоенно-волновой.

Чтобы определить скорости движения газа  $v_G$  и жидкости  $v_L$  на участке с устойчивым расслоенным характером разделения, необходимо для этого участка рассчитать истинное

$$\frac{2.38 \cdot (1 - \rho') \cdot \varphi^2 (1 - \varphi)^2}{(1 - \varepsilon)^{1.75} \cdot \varphi^2 - 1.19 \cdot \rho' \left(\frac{v_G}{v_L}\right)^{0.25} \cdot (2 - \varphi) \cdot (1 - \varphi)^2 \cdot \varepsilon^{1.75}} = \left(\frac{\lambda \cdot Fr}{2|\sin \alpha|}\right)^{0.575}$$

где  $\lambda$  – параметр, используемый для наклонных нисходящих каналов, определяется при помощи трансцендентного уравнения [12]:

$$\lambda = 0.067 \cdot \left[ \frac{158 \cdot v_L \sqrt{\lambda}}{(2g \cdot d \cdot |\sin \alpha|)^{0.5} \cdot d} + \frac{2\Delta}{d} \right]^{0.2}$$

$\Delta$  – шероховатость внутренней поверхности трубы, м,

$\rho'$  – отношение плотности газа  $\rho_G$  к плотности жидкости  $\rho_L$  при угле наклона к горизонту меньше нуля,

$$Fr - \text{критерий Фруда, } Fr = \frac{v_L^2}{g \cdot L}$$

Участок 4-5 имеет расслоенную структуру потока, для определения удельных потерь давления используется зависимость:

$$\varphi = \left( \frac{\lambda \cdot (1 - \varepsilon)^2 \cdot Fr}{2|\sin \alpha|} \right)^{0.4}$$

Данная зависимость применима при  $0 < \frac{\lambda \cdot (1 - \varepsilon)^2 \cdot Fr}{2|\sin \alpha|} < 0.18$ . В случае,

когда  $0.18 < \frac{\lambda \cdot (1 - \varepsilon)^2 \cdot Fr}{2|\sin \alpha|} < 1$  зависимость истинного и объемного газосодержаний приобретает вид:

$$\varphi = 0.615 \cdot \left( 1 - \frac{\lambda \cdot (1 - \varepsilon)^2 \cdot Fr}{2|\sin \alpha|} \right)$$

При невыполнении условия  $\frac{\lambda \cdot (1 - \varepsilon)^2 \cdot Fr}{2|\sin \alpha|} < 1$

можно считать, что разделение потока неполное и на поверхности жидкой фазы образуются волны. Структура движения становится расслоенно-волновой.

Для данного характера расслоения справедлива следующая эмпирическая зависимость между истинным объемным и объемным расходным газосодержаниями [12]:

Для упрощения математических расчетов за основной линейный размер  $L$  принимается эквивалентный диаметр  $d$ , сечения, занимаемого жидкостью при полном устойчивом расслоении потока. В случае расслоенно-волнового режима движения значения  $d$ , принимается аналогично. Формула для определения  $d$ , получена с учетом рис. 6.

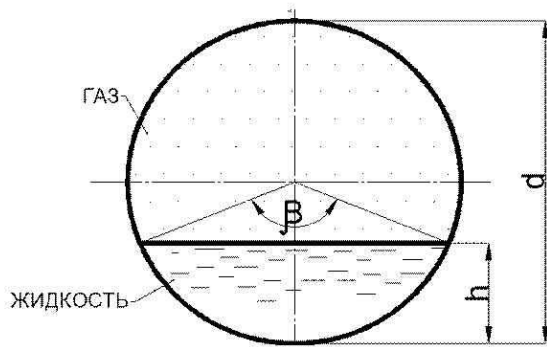


Рис. 6. Сечение трубопровода с расслоенным потоком водовоздушной смеси

Fig.6. Section of pipeline with the stratified flow of water-air mixture

$$d_3 = 4R,$$

где R – гидравлический радиус, м:

$$R = \frac{\omega_L}{\chi},$$

где  $\omega_L$  – площадь сечения, занимаемый жидкостью,  $m^2$ .

$\chi$  - смоченный периметр, м;

$$\chi = \pi d \frac{\beta}{2\pi},$$

где  $\beta$  – угол из рис. 6.

$$\omega_L = \omega(1 - \phi),$$

$\omega$  – полная площадь поперечного сечения трубопровода, по которому происходит расслоенное движение водовоздушной смеси,  $m^2$ .

Из вышеприведенных зависимостей выразим  $d_3$ :

$$d_3 = \frac{4\omega(1-\phi)}{\pi d \frac{\beta}{2\pi}}, [M].$$

На основании рис. 5 выразим h:

$$h = \frac{d}{2} - \frac{d}{2} \cos \frac{\beta}{2}, [M],$$

откуда  $\beta$  равно:

$$\beta = 2 \arccos \left( 1 - 2 \frac{h}{d} \right),$$

С учетом вышеприведенных преобразований,  $d_3$  равняется:

$$d_3 = \frac{\pi d (1-\phi)}{\arccos \left( 1 - 2 \frac{h}{d} \right)}, [M].$$

В результате решения системы уравнений из вышеприведенных зависимостей с помощью программы Mathcad возможно численно определить значение истинного объемного газосодержания  $\phi$  для любого характера расслоения.

Приведенная скорость газа  $v_G^{пр}$  определяется:

$$v_G^{пр} = \frac{Q_G}{\omega}, [M/c],$$

где  $Q_G$ – объемный расход газа, определяемый экспериментально,  $m^3/c$ .

Истинная скорость газа  $v_G$  определяется:

$$v_G = \frac{v_G^{пр}}{\phi}, [M/c].$$

Зная истинную скорость движения газа  $v_G$ , можно определить площадь поперечного сечения, занятого газом  $\omega_G$ :

$$\omega_G = \frac{Q_G}{v_G}, [M^2].$$

Площадь сечения, занимаемая жидкостью  $\omega_L$  в таком случае составит:

$$\omega_L = \omega - \omega_G, [M^2].$$

Истинная скорость движения жидкой фазы составит  $v_L$ :

$$v_L = \frac{Q_L}{\omega_L}, [M/c].$$

Таким образом, полученная зависимость учитывает различные структуры потока и позволяют определить потери давления на одном участке вакуумной системы транспортирования жидкости.

## ВЫВОДЫ

Анализ литературных источников показал, что на сегодняшний день вопрос канализования малых населенных пунктов стоит не только перед Украиной, но и перед многими государствами мира. Во многих местах его уже решают с помощью альтернативных способов канализования, а именно с применением вакуумной системы канализации, но применение этой системы не имеет глубокого научного обоснования и строгих математических зависимостей.

В данной статье рассмотрены предпосылки математического описания движения жидкости и газа под действием вакуумметрического давления.

Предложен метод расчета потерь давления с учетом изменения газожидкостной структуры потока для участка трубопровода при транспортировании жидкости под вакуумом.

Установлено:

- расчетная зависимость для определения потерь давления в системе вакуумного транспортирования жидкости отображает зависимость от основных гидродневматических характеристик, что делает ее довольно гибкой в ее применении для различных условий проектирования;

- расчет всей системы транспортирования жидкости под действием вакуумметрического давления может быть сведен к расчету одного участка;

- при пузырьковом и снарядном режимах движения поток гомогенный, скорости жидкой и газовой фаз одинаковы и принимаются равными скорости водовоздушной смеси;

- на участок с расслоенным или расслоенно-волновым режимом движения допущение о гомогенности потока не распространяется, следовательно, для расчета данного участка необходимо предварительно определить скорость газовой и жидкостной фаз.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Christopher E. Brennen, 2008. Fundamentals of Multiphase Flows: California Institute of Technology. - Pasadena, California, - 410.
2. Jing-yu Xu, Ying-xiang Wu, Zai-hong Shi and other, 2007. Studies on two-phase co-current air / non-Newtonian shear-thinning fluid flows in inclined smooth pipes. International journal of Multiphase flow. - Vol. 33. - 948-969.
3. Kapteina U., 1999. Dezentrale Abwasserreinigung im ländlichen Raum. Neue Landschaft. - N 6. - 388-390.
4. Schreff D., Wilderer P., 1999. Kleine Kläranlagen. Korrespond. Abwasser. - Vol. 46, N 10. - 1522-1525.
5. Trostinetsky E., Shemer L., Barnea D., 2004. Gas-liquid interfacial distribution in inclined downward pipe flow. - Warsaw. : ICTAM 2004.
6. Watanabe Y., 1997. Small wastewater treatment plants III. Water Science and Technology. - Vol. 35, N 6. - 1-154.
7. Григоренко Н.И., 2011. Исследование параметров основных элементов гидродневматической вакуумной системы канализации в лабораторных условиях: Вестник ДонНУСА. - Макеевка. - №2011-3(89). - 110-112.
8. Зайченко Л., Синежук И., 2012. Анализ реального водопотребления в жилищном фонде. MOTROL. - Commission of motorization and energetics in agriculture: Polish Academy of sciences. - Lublin. - Vol. 14.1. - 54-57.
9. Киселев П. Г., 1972. Справочник по гидравлическим расчетам. Изд 4-е, переработ. и доп. М.: «Энергия».
10. Лабунцов Д.А., Ягов В.В., 2000. Механика двухфазных систем [Учебное пособие для вузов] - М.: Издательство МЭИ. - 374.
11. Мамаев В.А., Одишария Г.Э., Семенов Н.И., Точигин А.А., 1969. Гидродинамика газожидкостных смесей в трубах. - М.: Недра. - 208.
12. Марон В.И., 2012. Гидравлика двухфазных потоков в трубопроводах [Учебное пособие для вузов] - СПб.: издательство «Лань». - 256.
13. Нездойминов В.И., Григоренко Н.И., Заворотный Д.В., 2010. Применение вакуумной канализации для малых населенных пунктов в Украине, Науковий вісник будівництва №2010-60.
14. Нездойминов В.И., Рожков В.С., Григоренко Н.И., 2012. Модель работы и расчет потерь давления на участке трубопровода системы вакуумной канализации. Науковий вісник будівництва: ХДТУБА. - Харьков. - вып. 70. - 312-317.
15. Нигматулин Р.И., 1987. Динамика многофазных сред, в 2-х частях - М.: «Наука».
16. Ситенков В.Т., 2006. Гидравлика. Теория и расчет двухфазных систем - Нижневартовск, - 121 с.
17. Уоллис Г., 1972. Одномерные двухфазные течения - М.: «Мир». - 440.
18. Чередниченко И.Л., 2009. Вакуумная канализация - инновационная технология для сбора сточных вод. Сантехника. Отопление. Кондиционирование. - №1. - 16-19.
19. Чермошнцева А.А., Шулюпин А.Н., 2011. Математическое моделирование пароводяных течений в элементах оборудования геотермальных промыслов: [Монография] - Камчат ГТУ. - Петропавловск-Камчатский. - 144.
20. Чисхолм Д. 1986. Двухфазные течения в трубопроводах и теплообменниках: Пер. с англ. - М.: Недра. - 204.

#### MATHEMATICAL DESCRIPTION OF FLOW STRUCTURE IN THE VACUUM GAS-LIQUID TRANSPORT SYSTEM

**Summary.** We consider a problem of the movement of two-phase flow liquid/gas in the vacuum sewer system. The calculation model of pressure losses along the length of one section taking into account the hydrodynamic characteristic was proposed. Calculation of the pressure gradient in the stratified structure of movement of gas-liquid mixture was refined.

**Key words:** two-phase flow, flow structure, pressure loss, the vacuum sewer system