

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЯ НА ВНУТРЕНнюю ПОВЕРХНОСТЬ НАКЛОННОЙ ТРУБЫ

© 2018

Б. В. Скворцов доктор технических наук, профессор кафедры электротехники; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва; aps@ssau.ru

М. И. Зарецкая кандидат технических наук, научный сотрудник; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва; aps@ssau.ru

И. С. Зарецкий аспирант кафедры электротехники; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва; aps@ssau.ru

П. А. Живоносный аспирант кафедры электротехники; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва; aps@ssau.ru

Проведено математическое моделирование ненапорного движения жидкости в полости наклонной трубы. Получена аналитическая зависимость скорости слива жидкости от радиуса обрабатываемой трубы и высоты уровня в наполняющей колонке. Предложен новый способ нанесения покрытия на внутреннюю поверхность трубы в условиях ограниченного пространства, в котором применяется управляемый слив наносимого материала с одновременным вращением её в процессе обработки. Толщина покрытия зависит от скорости движения материала по внутренней поверхности трубы. Представлены результаты расчёта. Приведены графики зависимости скорости движения материала в наклонной трубе при различных конструктивных параметрах, которые позволяют определить технологические режимы в процессе нанесения покрытия. Равномерность покрытия обеспечивается постоянной скоростью движения материала по всей длине трубы и в каждой точке внутренней поверхности – за счёт вращения. Проведён анализ полученных графиков и определено направление дальнейших исследований, связанных с учётом влияния угловой скорости вращения и вязкости жидкости. Использование предполагаемого метода позволяет повысить производительность труда и улучшить качество защитного покрытия.

Нанесение покрытия; наклонная труба; поток жидкости; скорость движения; математическая модель.

Цитирование: Скворцов Б.В., Зарецкая М.И., Зарецкий И.С., Живоносный П.А. Математическое моделирование нанесения покрытия на внутреннюю поверхность наклонной трубы // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2018. Т. 17, № 4. С. 165-172. DOI: 10.18287/2541-7533-2018-17-4-165-172

Введение

Известны способы и устройства, в которых нанесение покрытия на внутреннюю поверхность труб осуществляется методом наполнения материала (шликером) вертикальной трубы с последующим управляемым сливом, обеспечивающим его равномерное движение [1]. Постоянная скорость течения шликера обеспечивает равномерную толщину и качество покрытия. Теоретическое обоснование существующих методов и динамических режимов системы управления процессом нанесения покрытия описано в [2]. К недостаткам известных способов и реализующих их систем управления относится необходимость вертикального расположения трубы, что не всегда возможно в

условиях ограниченного пространства. Кроме того, при таком расположении труб необходимо использование подъёмных механизмов, что снижает производительность труда и требует высоких производственных помещений. Предлагается новый способ нанесения покрытий на внутреннюю поверхность трубы и описывается математическое моделирование важнейшего технологического элемента процесса, связанного с определением скорости движения материала при различных конструкционных параметрах устройства. Для реализации предлагаемого способа необходимо теоретическое обоснование процесса слива вязкого материала, включающего математическое моделирование движения в полости наклонной трубы. Элементы математического моделирования данных процессов представлены в работах [3;4]. Однако известные материалы не описывают динамику движения свободного слива вязкой жидкости в ненапорной (не полностью заполненной) наклонной трубе. Предложенный способ нанесения покрытия является развитием внедрённого технического решения на ОАО «НЕГАСПЕНЗАПРОМ» (г. Пенза). По результатам эксплуатации установки выявлена нерациональность использования подъёмных механизмов, связанная с установкой труб в вертикальном положении, что снижает производительность труда, увеличивает энергозатраты и себестоимость изделий.

Описание способа

В предлагаемом способе обрабатываемая труба находится в наклонном положении, слив материала покрытия осуществляется без напора путём стекания его со свободного конца трубы в принимающую ёмкость. В процессе обработки труба вращается, а уровень в наливной колонке поддерживается постоянным за счёт управления производительностью насоса по сигналу с датчика уровня, как показано на рис. 1 [5].

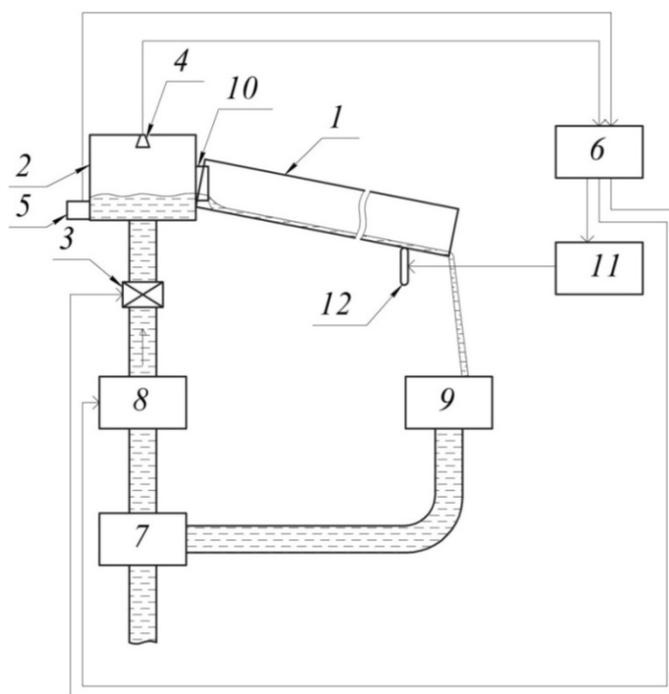


Рис. 1. Система нанесения покрытия:

1 – обрабатываемая труба; 2 – наполняющая колонка; 3 – отсекающий клапан; 4 – датчик уровня; 5 – датчик температуры; 6 – модуль обработки информации и управления; 7 – коллектор; 8 – насос; 9 – принимающая ёмкость; 10 – сливной штуцер; 11 – электропривод; 12 – вращающийся ролик

Нанесение покрытия осуществляется следующим образом. Обрабатываемая труба *1* устанавливается на вращающиеся ролики *12* и присоединяется верхним краем к наполняющей колонке *2* через сливной штуцер *10* таким образом, что нижний её конец остаётся свободным над принимающей ёмкостью *9*. Затем насос *8* через отсекающий клапан *3* из коллектора *7* закачивает материал в наполняющую колонку *2*, из которой материал вытекает в полость трубы *1*. Шликер, стекая по её внутренней поверхности, прилипает к ней и создаёт защитную плёнку. Толщина покрытия зависит от скорости движения материала по внутренней поверхности трубы, которая определяется высотой уровня в наполняющей колонке *2*. Шликер стекает из обрабатываемой трубы в принимающую ёмкость *9*, гидравлически сообщённую с коллектором *7*, задачей которого является поддержание постоянной температуры и консистенции материала покрытия. Целью управления является поддержание постоянной скорости движения материала по поверхности трубы. Для этого используется датчик уровня *4*, сигнал с которого идёт на модуль обработки информации и управления *6*. В качестве датчика уровня можно применять бесконтактные или лазерные устройства. На скорость движения материала влияет его текущая температура, которая контролируется датчиком температуры *5*. Сигнал с датчиков уровня *4* и температуры *5* идёт на вход модуля обработки информации и управления *6*, который корректирует производительность наполняющего насоса *8*. В процессе нанесения покрытия осуществляется плавное вращение обрабатываемой трубы, в результате которого обеспечивается равномерное распределение материала по внутреннему диаметру. Движение вращающего ролика *12* обеспечивается электроприводом *11*. Управление и обработка информации осуществляются блоком *6*.

Математическое моделирование

Для обоснования процедуры регулирования нанесением покрытия необходимо создать математическую модель движения материала, описывающую зависимость его скорости в полости трубы от свойств обрабатываемого изделия и параметров системы слива. Рассмотрим вытекание шликера из бака через круглое отверстие при неполном его заполнении (рис. 2).

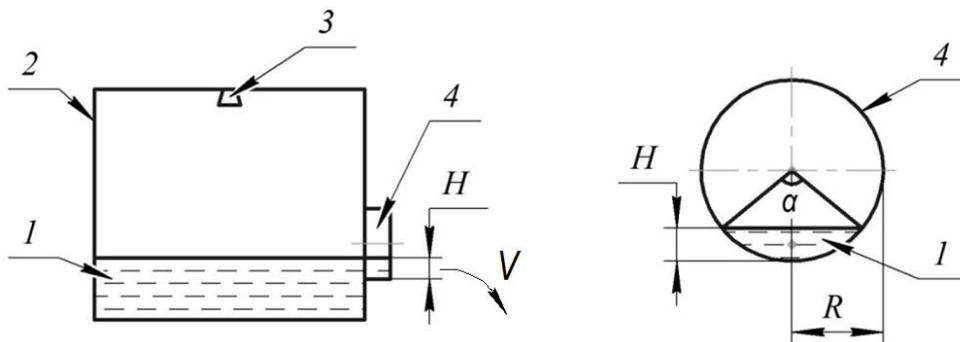


Рис. 2. Иллюстрация к математическому описанию движения материала через не полностью заполненное отверстие:

1 – шликер; *2* – наполняющая колонка; *3* – датчик уровня; *4* – сливной штуцер

При моделировании примем следующие допущения: жидкость несжимаема; угловая скорость вращения трубы ω настолько мала, что вихревое движение жидкости не возникает. Угловая скорость должна выбираться таким образом, чтобы не более чем за один оборот трубы элементарная частица жидкости прошла путь от одного края трубы до другого:

$$\omega \leq \frac{V}{L},$$

где V – скорость движения материала через сечение, L – длина трубы.

В этом случае мгновенный расход жидкости через отверстие произвольной формы при сливе определяется следующим выражением [6]:

$$dQ = \mu \sqrt{2gH} dS, \tag{1}$$

где dQ – мгновенный расход; μ определяется опытным путём, зависит от формы отверстия и условий подхода жидкости к отверстию, вязкости, шероховатости сливной трубы и скорости вращения; dS – элементарная площадь сечения жидкости; g – ускорение свободного падения, H – уровень жидкости над нижним краем сливного отверстия, высота сегмента.

Площадь сечения сливного отверстия, занимаемого жидкостью, равна площади сегмента круга, которая определяется по формуле [7]:

$$S = \frac{R^2}{2} (\alpha - \sin \alpha), \tag{2}$$

где S – площадь сегмента круга, занимаемая жидкостью; R – радиус сливного отверстия; α – угол (в радианах).

Из формулы высоты сегмента $H = R \left(1 - \cos \frac{\alpha}{2} \right)$ следует, что $\alpha = 2 \arccos \left(1 - \frac{H}{R} \right)$.

Подставляя полученное выражение в (2), получаем:

$$S(H) = R^2 \left[\arccos \left(1 - \frac{H}{R} \right) - \left(\left(1 - \frac{H}{R} \right) \sqrt{\frac{2H}{R} - \frac{H^2}{R^2}} \right) \right]. \tag{3}$$

Чтобы воспользоваться формулой (1) для определения потока жидкости через сечение, определим значение элементарной площади:

$$dS = S'(H) dH = \frac{2H(2R - H)}{\sqrt{2HR - H^2}} dH,$$

где $S'(H)$ – производная от выражения в (3).

Тогда поток через сечение элементарной площади сегмента круга определяется следующим образом:

$$dQ(H) = \mu \sqrt{2gH} dS = \frac{2\mu H \sqrt{2gH} (2R - H)}{\sqrt{2HR - H^2}} dH.$$

Выражение, определяющее поток жидкости через сечение, имеющее форму сегмента круга, будет иметь вид:

$$Q(H) = \int_0^H dQ(H) = \int_0^H \frac{2\mu H \sqrt{2gH}(2R-H)}{\sqrt{2HR-H^2}} dH =$$

$$= \frac{4\mu\sqrt{2g}}{15} \left(8\sqrt{2R^5} + \frac{4HR(2H+R)-16R^3-3H^3}{\sqrt{2R-H}} \right).$$

Задача управления состоит в том, чтобы поддерживать постоянный уровень наполнения сливной колонки для обеспечения стабильной скорости движения материала покрытия. Зная, что поток жидкости определяется как $Q = VS$, где V – скорость движения материала через сечение [8;9], получаем выражение для скорости движения жидкости через заданное сечение:

$$V(H) = \frac{Q(H)}{S(H)} = \frac{4\mu\sqrt{2gR} \left(8\sqrt{2} \sqrt{2 - \frac{H}{R}} + \left(\frac{4H}{R} \left(\frac{2H}{R} + 1 \right) - \left(16 + \frac{3H^3}{R^3} \right) \right) \right)}{15 \sqrt{2 - \frac{H}{R}} \left(\arccos \left(1 - \frac{H}{R} \right) - \left(\left(1 - \frac{H}{R} \right) \sqrt{\frac{2H}{R} - \frac{H^2}{R^2}} \right) \right)}. \quad (4)$$

Для упрощения введём обозначение $A = \frac{H}{R}$, и тогда выражение (4) примет вид:

$$V(A) = \frac{4\mu\sqrt{2gR} \left(8\sqrt{2} \sqrt{2 - A} + \left(4A(2A + 1) - \left(16 + 3A^3 \right) \right) \right)}{15 \sqrt{2 - A} \left(\arccos(1 - A) - \left((1 - A) \sqrt{2A - A^2} \right) \right)}. \quad (5)$$

По формуле (5) получены графики зависимости скорости движения материала в наклонной трубе, представленные на рис. 3. Расчёты проведены при $\mu = 0,1$. Полученные зависимости позволяют определить технологические режимы в процессе нанесения покрытия.

Скорость движения материала определяет толщину покрытия в соответствии с технологическими таблицами [10]. Графики на рис. 3 позволяют определить высоту уровня жидкости, которую нужно поддерживать для обеспечения заданной скорости движения материала.

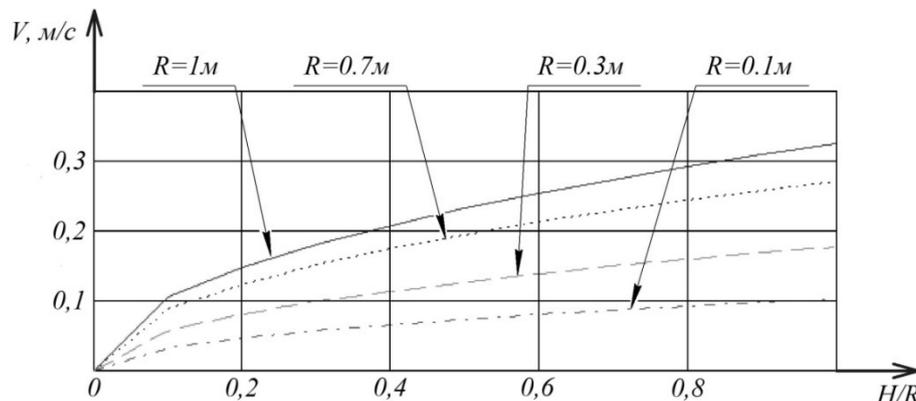


Рис. 3. Зависимость скорости от относительной высоты заполнения сливного отверстия при разных диаметрах трубы

Результаты расчётов хорошо согласуются с известными данными, приведёнными в [10], в частности по диапазонам изменения скорости при указанных геометрических параметрах трубы. В предложенной математической модели не учитываются в детальной форме факторы, связанные с углом наклона и шероховатостью трубы, а также свойствами материала покрытия и угловой скоростью. В скрытой форме перечисленные параметры учтены коэффициентом μ . Детализация влияния этих факторов предполагается в дальнейших исследованиях.

Заключение

Разработанная математическая модель движения жидкости по наклонной поверхности, связывающая скорость шликера с его физическими характеристиками и конструктивными параметрами трубы, позволяет исследовать влияние различных факторов на процессы нанесения покрытия. Получено аналитическое выражение для определения скорости вязкой жидкости в полости наклонной трубы. Новизна модели состоит в том, что впервые учтены конструктивные параметры, которые включают вязкость шликера, размеры трубы, высоту уровня материала по сечению трубы. Равномерность покрытия обеспечивается постоянной скоростью движения материала по всей длине трубы и в каждой точке внутренней поверхности – за счёт вращения. Математическая модель может иметь применение при учёте расхода в канализации и системах водоотведения по ненапорным трубопроводам, в системах слива очистных сооружениях, в нефтехимической промышленности.

Библиографический список

1. Скворцов Б.В., Зарецкая М.И., Курьлёва П.А. Способ нанесения покрытия на внутреннюю поверхность изделий цилиндрической формы: патент РФ № 2551518; опубл. 27.05.15; бюл. № 15.
2. Зарецкая М.И., Скворцов Б.В. Система автоматического управления нанесением покрытий на внутреннюю поверхность полых изделий и её имитационное моделирование // Известия РАН. Теория и системы управления. 2017. № 2. С. 92-100. DOI: 10.7868/S0002338817020160
3. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. В 10 т. Т. VI. Гидродинамика. М.: Физматлит, 2001. 736 с.
4. Валландер С.В. Лекции по гидроаэромеханике. Л.: ЛГУ, 1978. 295 с.
5. Скворцов Б.В., Зарецкая М.И., Зарецкий И.С., Таипова Д.Р. Способ нанесения изолирующих покрытий на внутреннюю поверхность трубы формы: патент РФ № 2656664; опубл. 06.06.18; бюл. № 16.
6. Триандафилов А.Ф., Ефимова С.Г. Гидравлика и гидродинамические машины: учеб. пособие. Сыктывкар: СЛИ, 2012. 212 с.
7. Выгодский М.Я. Справочник по элементарной математике. М.: Наука, 1966. 424 с.
8. Ачеркан Н.С. Справочник машиностроителя: в 6 т. Т. 2. М.: Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, 1956. 559 с.
9. Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике для инженеров и студентов вузов: учеб. пособие. М.: Наука, 1974. 942 с.
10. Скворцов Б.В., Зарецкая М.И., Борминский С.А. Методы и устройства нанесения покрытий на внутреннюю поверхность труб. Самара: СНЦ РАН, 2015. 120 с.

PROCESS OF COATING THE INNER SURFACE OF AN INCLINED PIPE AND ITS MATHEMATICAL MODELING

© 2018

B. V. Skvortsov Doctor of Science (Engineering), Professor of the Department of Electrical Engineering; Samara National Research University, Samara, Russian Federation; aps@ssau.ru

M. I. Zaretskaya Candidate of Science (Engineering), Research Associate; Samara National Research University, Samara, Russian Federation; aps@ssau.ru

I. S. Zaretskiy Postgraduate Student of the Department of Electrical Engineering; Samara National Research University, Samara, Russian Federation; aps@ssau.ru

P. A. Zhivonosnovskiy Postgraduate Student of the Department of Electrical Engineering; Samara National Research University, Samara, Russian Federation; aps@ssau.ru

A new method is proposed for coating the inner surface of pipes in a confined space in which a sloping position of the pipe is expected during the process. Mathematical modeling of non-pressure fluid flow in an inclined pipe was carried out. The method implies controlled outflow of the material being applied and simultaneous rotation of the pipe being worked. The thickness of the coating depends on the velocity of the material flow along the inner surface of the pipe. The dependence of the fluid velocity on the radius of the pipe being worked and the level height in the filling column is calculated. The results of calculating the analytical dependence in the Mathcad application are presented. Dependence diagrams of material flow are presented for various design parameters that make it possible to determine the operating practices in the process of applying the coating. Uniform coating is obtained due to constant velocity of the material flow along the full length of the pipe. The obtained graphs were analyzed and the direction of further research connected with the influence of rotational velocity and fluid viscosity was determined. The use of the proposed method makes it possible to increase labor productivity and improve the quality of protective coating.

Coating application; velocity; fluid flow; inclined pipe; mathematical model.

Citation: Skvortsov B.V., Zaretskaya M.I., Zaretskiy I.S., Zhivonosnovskiy P.A. Process of coating the inner surface of an inclined pipe and its mathematical modeling. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2018. V. 17, no. 4. P. 165-172. DOI: 10.18287/2541-7533-2018-17-4-165-172

References

1. Skvortsov B.V., Zaretskaya M.I., Kuryleva P.A. *Sposob naneseniya pokrytiya na vnutrennyuyu poverkhnost' izdeliy tsilindricheskoy formy* [A method of applying coating on the inner surface of cylindrical products]. Patent RF, no. 2551518, 2015. (Publ. 27.05.15, bull. no. 15)
2. Zaretskaya M.I., Skvortsov B.V. Automatic control system for a pipe's inner surface coating. *Journal of Computer and Systems Sciences International*. 2017. V. 56, Iss. 2. P. 259-267. DOI: 10.1134/s1064230717020162
3. Landau L.D., Lifshits E.M. *Teoreticheskaya fizika. V 10 t. T. VI. Gidrodinamika* [Theoretical physics. In 10 v. V. VI. Fluid dynamics]. Moscow: Fizmatlit Publ., 2001. 736 p.
4. Vallander S.V. *Lektsii po gidroaeromekhanike* [Lectures on fluid mechanics]. Leningrad: Leningrad State University Publ., 1978. 295 p.
5. Skvortsov B.V., Zaretskaya M.I., Zaretskiy I.S., Taipova D.R. *Sposob naneseniya izoliruyushchikh pokrytiy na vnutrennyuyu poverkhnost' trubny formy* [A method of applying insulating coatings on the inner surface of a mold pipe]. Patent RF, no. 2656664, 2015. (Publ. 06.06.18, bull. no. 16)

6. Triandafilov A.F., Efimova S.G. *Gidravlika i gidrodinamicheskie mashiny: uchebnoye posobiye* [Hydraulics and hydrodynamic machines: study guide]. Syktyvkar: SLI Publ., 2012. 212 p.

7. Vygodskiy M.Ya. *Spravochnik po elementarnoy matematike* [Elementary mathematics handbook]. Moscow: Nauka Publ., 1966. 424 p.

8. Acherkan N.S. *Spravochnik mashinostroytelya: v 6 t. T. 2.* [Mechanical engineering handbook]. Moscow: Gosudarstvennoe Nauchno-tekhnicheskoe Izdatel'stvo Mashinostroytel'noy Literatury Publ., 1956. 559 p.

9. Yavorskiy B.M., Detlaf A.A. *Spravochnik po fizike dlya inzhenerov i studentov vuzov: uchebnoye posobiye* [Physics handbook for engineers and university students: study guide]. Moscow: Nauka Publ., 1974. 942 p.

10. Skvortsov B.V., Zaretskaya M.I., Borminskiy S.A. *Metody i ustroystva naneseniya pokrytiy na vnutrennyuyu poverkhnost' trub* [Methods and devices for coating the inner surface of pipes]. Samara: Samarskiy Nauchnyy Tsentr RAN Publ., 2015. 120 p.