

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ СТРУЕФОРМИРУЮЩЕЙ ГОЛОВКИ ДЛЯ ВОДОПОЛИМЕРНОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ РЕЗАНИЕМ

Предложен гидродинамический расчет проточной части струеформирующей головки для водополимерной обработки материалов резанием, основанный на использовании установленного критерия $\theta_c = 1/\dot{\epsilon}_{кр}$, в который входят время релаксации θ_c раствора полимера и продольный градиент скорости $\dot{\epsilon}_{кр}$, реализуемый при протекании раствора через сопло гидрорежущей головки. Для времени релаксации полимерного раствора получено аналитическое выражение, связывающее экспериментально наблюдаемое время релаксации раствора полимера с временем релаксации при экстраполяции к нулевой концентрации. Справедливость найденного соотношения, позволяющего связать время релаксации полимерного раствора с концентрацией, температурой и характеристической вязкостью, подтверждают результаты исследований концентрационной зависимости времени релаксации двух фракций полиэтиленоксида в воде. Предложенный инженерный метод расчета параметров струеформирующей головки для обработки водополимерной струей материалов резанием позволил разработать проектно-техническую документацию на гидрорежущую пищевые продукты установку. За счет реализации процесса гидроструйной водополимерной обработки пищевых продуктов резанием удалось существенно понизить рабочее давление (в 4-5 раз), что позволило изготовить опытный образец установки для гидрорезки со стоимостью в 10 раз меньшей, чем стоимость стандартного оборудования.

Ключевые слова: водополимерная обработка; струеформирующая головка; сопло; раствор полимера; время релаксации; продольный градиент скорости.

Введение. Проведенное комплексное изучение реакции водных растворов полиэтиленоксида (ПЭО) на гидродинамические воздействия позволило выяснить природу высокой эффективности гидроструйной водополимерной обработки материалов резанием, которая обусловлена деформационными эффектами при их течении через сопло гидрорежущей головки (Pogrebnyak, 2008; Pogrebnyak & Ivanyuta, 2015; Deynichenko, Pogrebnyak & Ivanyuta, 2015; Pogrebnyak, 2015; Pogrebnyak & Deynichenko, 2016). Она – комплексность – дала возможность сформулировать некоторую новую структурную концепцию, "общим знаменателем" которой является сильное деформационное воздействие гидродинамического поля на макромолекулы полимера, что немедленно порождает проявление каучукоподобных свойств, а образующиеся ассоциаты независимо от их природы – своего рода резиноподобную высокоэластичность.

Научно обоснованный путь разработки технологии гидроструйной водополимерной резки материалов и есть путь, связанный с использованием резиноподобных свойств раствора полимера, которые могут возникнуть при определенных условиях протекания через сопло гидрорежущей головки.

Движущаяся с большой скоростью водополимерная струя представляет собой "армированную" струю жидкости сильно развернутыми макромолекулярными цепями и надмолекулярными структурами, образующимися под действием растягивающего течения (Pogrebnyak, 2008; Pogrebnyak & Ivanyuta, 2015; Deynichenko, Pogrebnyak & Ivanyuta, 2015). При этом происходит увеличение компактности струи. Повышенная компактность водополимерной струи способствует увеличению ее режущей способности (Pogrebnyak, 2008; Pogrebnyak & Deynichenko, 2016).

Формирование динамических надмолекулярных

структур в процессе протекания раствора полимера через струеформирующую головку зависит от диаметра выходного отверстия сопла, угла входа в отверстие, гидродинамического режима течения раствора, концентрации и молекулярной массы полимера (Deynichenko, Pogrebnyak & Ivanyuta, 2015; Pogrebnyak & Voloshin, 2010). Далеко не все эти параметры поддаются строгому количественному расчету, и поэтому при прогнозировании оптимальных технологических показателей гидроструйной водополимерной обработки пищевых продуктов резанием приходится использовать не только точный инженерный расчет, но и в значительной мере эмпирически полученные критерии.

Целью исследования является разработка инженерного метода расчета параметров высокоэффективной струеформирующей головки для водополимерной обработки материалов резанием.

Результаты исследования и их обсуждение. Одна из основных проблем, которую необходимо решать при разработке конструкции гидрорежущей струеформирующей головки в свете получения гидродинамических параметров гидроструи, обеспечивающей максимальную производительность – определение оптимального соотношения между диаметром выходного отверстия сопла, углом входа в отверстие и скоростью водополимерной струи.

Гидродинамический расчет режимов струеформирующей головки основан на использовании установленного критерия

$$\epsilon \theta_c \geq De_{кр}, \quad (1)$$

в который входят время релаксации θ_c раствора полимера и продольный градиент скорости $\dot{\epsilon}_{кр}$, при выполнении которого в растворах формируются динамические надмолекулярные структуры (Pogrebnyak & Ivanyuta, 2015; Pogrebnyak & Voloshin, 2010). Соотношение (1) следует трактовать как число Деборы, т. к. обратная ве-

личина продольного градиента скорости – это не что иное, как временной масштаб течения (Bazilevskij et al., 1991; Astarita & Maguchchi, 1978). Таким образом, расчет сводится к определению θ_c и $\dot{\epsilon}_{кр}$.

Время релаксации поддается вычислению, для чего получим ниже в аналитическом виде выражение, связывающее θ_c с концентрацией, температурой и молекулярными характеристиками ПЭО. Изменение вязкости водного раствора при добавлении в него макромолекул подчиняется следующему закону (Baranov et al., 1986):

$$\eta_c = \eta_s e^{\psi_m} \quad (2)$$

где: η_s – вязкость воды, ψ_m – объемная доля макромолекул. В свою очередь (Eliashevich & Frenkel, 1980)

$$[\eta]_0 = \frac{\Phi_f}{M} \langle h^2 \rangle^{3/2} \quad (3)$$

Здесь Φ_f – константа Флори и $\langle h^2 \rangle$ – среднеквадратичное расстояние между концами цепи макромолекулы. Принимая, что среднеквадратичный радиус макромолекулы $\langle R^2 \rangle = \frac{1}{6} \langle h^2 \rangle$, а её объём $v_o = \frac{4}{3} \pi \langle R^2 \rangle^{3/2}$, вместо соотношения (3) запишем

$$[\eta]_0 = 3,5 \Phi \frac{v_o}{M} \quad (4)$$

или при $\Phi > 1,7 \cdot 10^{23}$ (Weissberg, Simha & Rothaman, 1951; Jemakawa, 1961)

$$[\eta]_0 = \frac{v_o}{M} \quad (5)$$

где v_o – некий эффективный мольный объем макромолекулы при бесконечном разбавлении раствора полимера. Объемную долю, занимаемую макромолекулой полимера, можно записать в виде

$$\psi_m = v_c \cdot n_m \quad (6)$$

где v_c – мольный объем макромолекулы при заданной концентрации полимера в растворе; n_m – число молей в единице объема. Тогда, учитывая формулу (5), запишем

$$\psi_m = \frac{v_c}{M} \cdot M \cdot n_m = [\eta]_c \cdot C \quad (7)$$

где $[\eta]_c$ – так называемая текущая характеристическая вязкость, т.е. характеристическая вязкость при заданной концентрации полимера в растворе, $M \cdot n_m$ выражено в г/см³ полимера. Откуда

$$\eta_c = \eta_s e^{[\eta]_c \cdot C} \quad (8)$$

или $\ln \frac{\eta_c}{\eta_s} = \ln \eta_{отн} = [\eta]_c \cdot C \quad (9)$

Время релаксации связано (при экстраполяции на бесконечное разбавление) с молекулярной массой ПЭО, $[\eta]_0$ и η_s следующим образом (Zimm, 1956):

$$\theta_0 = A \frac{M [\eta]_0 \eta_s}{RT^o} \quad (10)$$

Концентрационная зависимость $\ln \eta_{отн}$ в общей форме в соответствии с рис. 1 имеет вид

$$\ln \eta_{отн} = ([\eta]_0 \cdot C)^a \quad (11)$$

Используя соотношение (9), получаем

$$[\eta]_c = \frac{([\eta]_0 \cdot C)^a}{C} \quad (12)$$

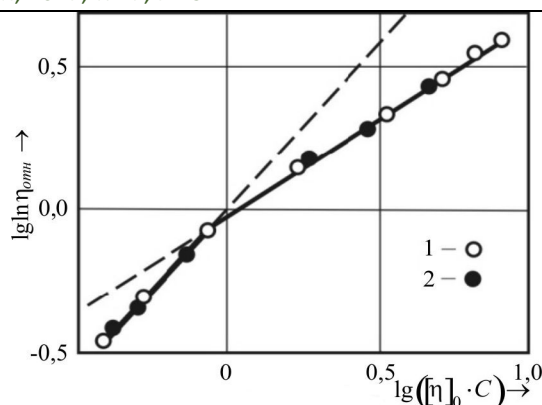


Рис. 1. Зависимость относительной вязкости водных растворов ПЭО от концентрации: $M_{ПЭО}$: 1 – $4 \cdot 10^6$, 2 – $2,5 \cdot 10^6$

Результаты, полученные в работе (Baranov et al., 1986), позволяют полагать, что соотношение (10) можно обобщить на случай полуразбавленных растворов, заменив $[\eta]_0$ на $[\eta]_c$, а η_s – на вязкость водного раствора ПЭО η_c . Тогда

$$\theta_c = A \frac{M [\eta]_c \eta_c}{RT^o} \quad (13)$$

Используя соотношение (9), (12) и подставляя в (13), после несложных преобразований, имеем

$$\theta_c = A \frac{M [\eta]_0 \cdot \eta_s}{RT^o} ([\eta]_0 \cdot C)^{a-1} e^{([\eta]_0 \cdot C)^a} \quad (14)$$

Учитывая (10), обозначая $[\eta]_0 \cdot C = k$ и подставив в (14), получим

$$\theta_c = \theta_0 k^{a-1} e^{k^a} \quad (15)$$

Проведенный анализ экспериментальных данных (рис. 1) показывает, что в области малых концентраций, когда $k < 1$, справедливо:

$$\ln \eta_{отн} = k \quad (16)$$

Используя соотношения (15) и (16), получим

$$\theta_c = \theta_0 e^k \text{ при } k < 1 \quad (17)$$

Зависимость θ_c / θ_0 от $[\eta]_0 \cdot C$ для ПЭО двух молекулярных масс в воде представлена на рис. 2.

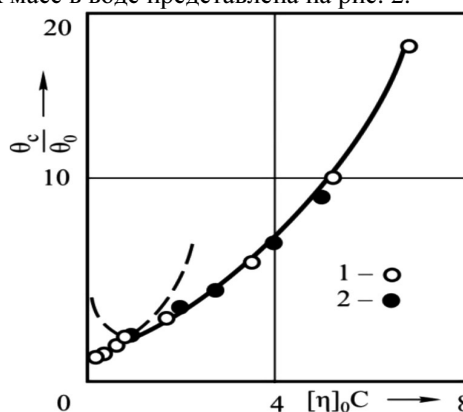


Рис. 2. Зависимость θ_c / θ_0 от концентрации ПЭО в растворе: $M_{ПЭО}$: 1 – $4 \cdot 10^6$, 2 – $2,5 \cdot 10^6$

Сплошной линией показан ход зависимости, полученной согласно выражению (17). Видно, что экспериментальные точки для соответствующей концентрационной области удовлетворительно ложатся на расчетную кривую. Таким образом, выражение (17) позволяет вычислить время релаксации водных растворов ПЭО по известным молекулярным характеристикам ПЭО. Вли-

яние температуры в этом выражении учитывается температурной зависимостью θ_0 и k .

Продольный градиент скорости. Задачу определения продольного градиента скорости можно свести к

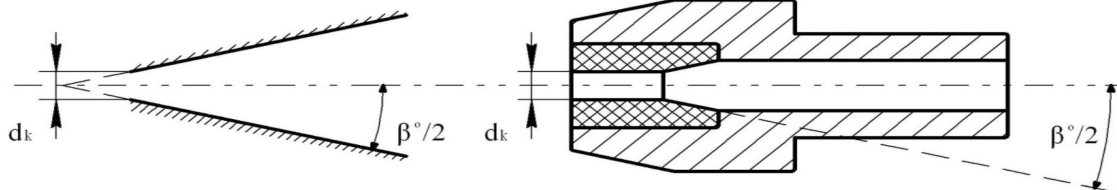


Рис. 3. Схема входной области сопла

Естественным ограничением применимости соотношения для градиента скорости, полученного при решении задачи о течении ньютоновской жидкости в конфузоре, для расчета $\dot{\epsilon}$, реализуемого при течении раствора полимера, являются расходные скорости и углы входа, с которых проявляется закритический режим истечения из сопла струеформирующей головки. При этом критическое число $De_{кр}$ необходимо определять из эксперимента. В качестве критического числа Деборы берется число, при котором начинает проявляться у водополимерной струи более высокая, чем у водяной струи режущая способность.

Используя решение уравнения движения в конфузоре и данные (Landau, Lifshic, 1988; Khurmi, 2005) для не слишком больших β^0 ($\beta^0 < \pi/2$) получим

$$\dot{\epsilon} \approx \frac{2 \cdot Q \cdot \operatorname{tg}(\beta^0/2)}{A \cdot d_k}, \quad (18)$$

где: Q – скорость истечения раствора полимера; A – коэффициент проницаемости сопла гидрорежущей струеформирующей головки; d_k – диаметр отверстия сопла; β^0 – угол отсчитываемый указанным на рис. 3 образом.

Подставив (17) и (18) в (1), условие формирования динамических надмолекулярных структур в водных растворах ПЭО при их истечении из сопла, которое должно выполняться при проектировании конфигурации сопла гидрорежущей головки, приобретает вид:

$$\frac{\theta_0}{d_k^3} \cdot \exp\{([\eta]_0 \cdot C)\} \cdot 2 \cdot Q \cdot \operatorname{tg} \frac{\beta^0}{2} \geq De_{кр}, \text{ при } \beta^0 < \frac{\pi}{2}, \quad (19)$$

когда $[\eta]_0 \cdot C \leq 1$. В уравнении (19) $A \cdot d_k$ заменено на d_k^3 , что возможно при экспериментальном определении критического числа Деборы. В соответствии с экспериментальными данными (Pogrebnyak, 2015; Pogrebnyak & Deynichenko, 2016), для практически важных диапазонов концентраций (0,001–0,05 %) и мол. масс ($3 \cdot 10^6$, $4 \cdot 10^6$ и $6 \cdot 10^6$) водных растворов ПЭО, критическое число Деборы равно 1,0.

Из полученного соотношения (19) следует, что способность к формированию динамических надмолекулярных структур в водополимерной струе возрастает с увеличением угла входа в сопловое отверстие, скорости струи, исходной концентрации и мол. массы полимера, а также с уменьшением диаметра сопла.

Предложенный инженерный метод расчета параметров струеформирующей головки для обработки водополимерной струей материалов резанием позволил разработать проектно-техническую документацию на гидрорежущую пищевые продукты установку. Опытный обра-

зационному движению ньютоновской жидкости в конфузоре (на рис. 3 изображен поперечный разрез сопловой части головки).

зец гидрорежущей установки для обработки водополимерной струей пищевых продуктов резанием приведен на рис. 4, которая устанавливается на столе. Под столом находятся насос, ресивер и емкость для рабочей жидкости – раствор полимера.

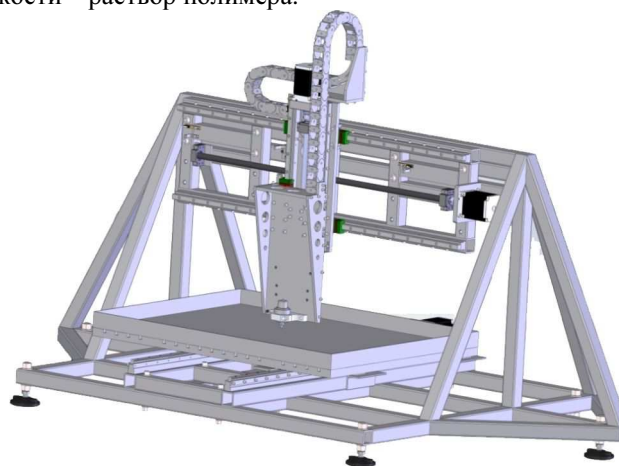


Рис. 4. Гидрорежущая установка для обработки водополимерной струей пищевых продуктов резанием

Данные, характеризующие высокую эффективность водополимерного гидрорезания, полученные при исследовательско-промышленной апробации, изложены в работах (Pogrebnyak, 2015; Pogrebnyak & Deynichenko, 2016). За счет оптимизации процесса гидроструйной водополимерной обработки пищевых продуктов резанием удалось существенно понизить рабочее давление (в 4–5 раз), что позволило изготовить опытный образец установки для гидрорезки со стоимостью в 10 раз меньшей, чем стоимость стандартного оборудования.

Выводы:

1. Использование разработанных научно обоснованных принципов проектно-расчетных проработок струеформирующих сопел позволило изготовить опытный образец гидрорежущей установки, исследовательско-промышленная апробация которой показала высокую эффективность процесса гидроструйной водополимерной обработки материалов (на примере замороженных пищевых продуктов), практическую целесообразность и экономическую эффективность водополимерной обработки материалов резанием. Этим подтверждается достаточная эффективность предложенного метода расчета параметров струеформирующей головки для водополимерной гидрорезки материалов.
2. Использование растворов полимеров в качестве рабочей жидкости требует дальнейших исследований процесса взаимодействия водополимерной струи с разрезаемым материалом для получения расчетной зависи-

мости глубины реза в материале от его прочности, оптимального расстояния между срезом сопла и поверхностью материала, диаметра сопла, концентрации и молекулярной массы полимера, а также гидравлических и режимных параметров, скорости перемещения и качества формирования водополимерной струи.

Перелік використаних джерел

- Astarita, Dzh., & Maruchchi, Dzh. (1978). *Osnovy gidromehaniki nenjutonovskih zhidkostej*. Moscow: Mir, 309 p. [in Russian].
- Baranov, V. G., Brestkin, Yu. V., Agranova, S. A., & Pinkevich, V. N. (1986). Povedenie makromolekul polistirola v "zagushhennom" horoshem rastvoritelej. *Vysokomolekuljarnye soedinenija. Seriya: Biologicheskaja*, 28(11), 841–843. [in Russian].
- Bazilevskij, A. V., Entov, V. M., Karpov, A. V. et al. (1991). *Vremja relaksacii rastvorov polimerov: Metodika izmerenija i nekotorye ee prilozhenija*. Moscow: IPM RAN, 42 p. [in Russian].
- Deynichenko, G. V., Pogrebnyak, A. V., & Ivanyuta, Yu. F. (2015). The nature of increased cutting ability of a polyethylene oxide solution jet while processing food products. *Scientific journal NRU ITMO. Series: Processes and Food Production Equipment*, 3(25), 6–13.
- Eliashevich, G. K., & Frenkel, S. Ya. (1980). Thermodynamics of the orientation of solutions and melts of polymers. *Oriental phenomena in polymer solutions and melts*, 5, 9–90. Moscow: Chemistry.
- Jemakawa, H. (1961). Concentration dependence of polymer chain configurations in solution. *J. Chem. Phys.*, 34(4), 1360–1372.

- Khurmi, R. S. (2005). *Nttxbook of Hydraulics, Fluid mechanics and hydraulic machines*. New Delhi: S. Chand, 666 p.
- Landau, L. D., Lifshic, E. M. (1988). *Teoreticheskaja fizika*. In 10 vols, vol. 6. *Gidromehanika*. Vols. 4. Moscow: Nauka, 733 p. [in Russian].
- Pogrebnyak, A. V. (2008). Highly effective hydrocutting of firm foodstuff and materials. *Control rheological properties of food*, 4, 173–179. Moscow: Moscow State University of food productions.
- Pogrebnyak, A. V. (2015). The process of hydrocutting of food products. *Innovative aspects of development of the equipment of the food and hotel industry in the conditions of the present. Abstract of candidate dissertation for technical sciences*, 3, 14–19. Kharkiv: State university of food technology and trade Publ.
- Pogrebnyak, A. V., & Deynichenko, G. V. (2016). Research of the process of hydrocutting foodstuff. *Scientific journal NRU ITMO. Series: Processes and equipment for food production*, 3(29), 48–62.
- Pogrebnyak, A. V., & Ivanyuta, Yu. F. (2015). Structure formation in polyethyleneoxide solution streaming through jet-shaping head while cutting foodstuffs. *Scientific journal NRU ITMO. Series: Processes and Food Production Equipment*, 1(23), 138–141.
- Pogrebnyak, V. G., & Voloshin, V. S. (2010). *Ecological Technology of Creating Waterproof Screens*. Donetsk, Knowledge, 482 p.
- Weissberg, S., Simha, R., & Rothaman, S. (1951). Viscosity of dilute and moderately concentrated polymer solutions. *J. Res. Nat. Bur. Standarts*, 47, 293–298.
- Zimm, B. H. (1956). Dynamics of polymer molecules in dilute solution: viscoelasticity, flow birefringence and dielectric loss. *J. Chem. Phys.*, 24(2), 269–278.

A. V. Погребняк

РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ СТРУМЕНЕФОРМУВАЛЬНОЇ ГОЛІВКИ ДЛЯ ВОДОПОЛІМЕРНОГО ОБРОБЛЕННЯ МАТЕРІАЛІВ РІЗАННЯМ

Запропоновано гідродинамічний розрахунок проточної частини струменеформуваної голівки для водополимерного оброблення матеріалів різанням, що ґрунтується на використанні встановленого критерію $\theta_C = 1/\varepsilon_{sp}$, до якого входять час релаксації θ_C розчину полімеру і поздовжній градієнт швидкості, що реалізується під час протікання розчину через сопло гідрорізальної голівки. Для часу релаксації полімерного розчину отримано аналітичний вираз, що зв'язує експериментально спостережуваний час релаксації розчину полімеру з часом релаксації при екстраполяції до нульової концентрації. Справедливість знайденого співвідношення, що дає змогу зв'язати час релаксації полімерного розчину з концентрацією, температурою і характеристичною в'язкістю, підтверджують результати дослідження концентраційної залежності часу релаксації двох фракцій поліетеленоксиду в воді. Запропонований інженерний метод розрахунку параметрів гідрорізальної голівки для оброблення водополимерним струменем матеріалів різанням дав змогу розробити проектно-технічну документацію на гідрорізальне харчові продукти устаткування. Завдяки реалізації процесу гідроструминного водополимерного оброблення харчових продуктів різанням вдалося істотно знизити робочий тиск (у 4–5 разів), що дозволило виготовити дослідний зразок установки для гідрорізки з вартістю у 10 разів меншою, ніж вартість стандартного устаткування.

Ключові слова: водополимерне оброблення; струменеформувальна голівка; сопло; розчин полімеру; час релаксації; поздовжній градієнт швидкості.

A. V. Pogrebnyak

CALCULATION OF PARAMETERS OF JET-SHAPING HEAD FOR WATER-POLYMER PROCESSING OF MATERIALS BY CUTTING

When forecasting the optimal technological parameters of hydro jet water-polymer processing of food products, cutting requires not only accurate engineering calculations, but also empirically obtained criteria. Therefore the aim of the study is to develop an engineering method for calculating the parameters of a highly effective jet head for water-polymer processing of materials by cutting. A proposed hydrodynamic calculation of the flow part of the jet head for water-polymer processing of materials by cutting is based on the use of the established criterion $\theta_C = 1/\varepsilon_{sp}$, which includes the relaxation time of the polymer solution θ_C and the longitudinal velocity gradient ε_{sp} implemented by flowing the solution through the nozzle of the hydro-cutting head. An analytical expression for the relaxation time of the polymer solution is obtained. This expression relates the experimentally observed relaxation time of the polymer solution to the relaxation time upon extrapolation to zero concentration. The validity of the discovered relationship, which allows relating the relaxation time of a polymer solution with concentration, temperature, and intrinsic viscosity, is confirmed by the results of studies of the concentration dependence of the relaxation time of two polyethylene oxide fractions in water. The proposed engineering method for calculating the parameters of the jet head for cutting of materials by water-polymer flow enabled to develop design and technical documentation for hydro-cutting equipment for the food products. Due to the implementation of the water-polymer jet processing of food products, it was possible to significantly reduce the working pressure (by 4–5 times), which allowed to produce a prototype of a water jet cutting unit with a cost 10 times lower than the cost of standard equipment. Thus, the research and industrial approbation of the prototype of the water jet cutting machine has confirmed the high efficiency of the process of water-polymer cutting of food products, the practical expediency and economical effectiveness of hydro jet water-polymer processing of food products by cutting, especially at low temperatures.

Keywords: water-polymer processing; jet-shaping head; nozzle; polymer solution; relaxation time; longitudinal velocity gradient.

Інформація про автора:

Погребняк Андрій Володимирович, канд. техн. наук, доцент, провідний науковий співробітник, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, м. Івано-Франківськ, Україна. Email: Pogrebnyak.AV@mail.ru