

Валерій Бакалов¹, Віктор Кузьменко², Ігор Яриш³¹кандидат технічних наук, доцент, науковий співробітник

Державний науково-дослідний інститут випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки (Чернігів, Україна)

E-mail: bakalow1972@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8602-7778>. ResearcherID: [J-1337-2014](https://orcid.org/J-1337-2014)²начальник науково-дослідного відділу

Державний науково-дослідний інститут випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки (Чернігів, Україна)

E-mail: dbrnjh.z@ukr.net. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8008-4299>. ResearcherID: [GLQ-8442-2022](https://orcid.org/GLQ-8442-2022)³науковий співробітник

Державний науково-дослідний інститут випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки (Чернігів, Україна)

E-mail: peredaha0983@ukr.net. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0212-0466>. ResearcherID: [GLQ-7481-2022](https://orcid.org/GLQ-7481-2022)**ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАЛЕЖНОСТІ НАПРУЖЕНЬ ЗСУВУ ПОЛІЕТИЛЕНУ
ВІД ТЕМПЕРАТУРИ І ШВИДКОСТІ ЗСУВУ**

На основі проведених досліджень отримано рівняння залежності напруження зсуву поліетилену від швидкості його зсуву та температури. У рівнянні напруження зсуву прямо пропорційне умовній в'язкості та градієнту швидкості зсуву в ступені, який є індексом течії. Показано, що умовна в'язкість поліетилену добре описується рівнянням Арреніуса, а індекс течії має квадратичну залежність від температури. Отримане узагальнене рівняння напружень зсуву поліетилену від швидкості його зсуву та температури дозволить більш точно розраховувати геометричні розміри формуючих каналів екструдерів, плоскощілинних головок, а також удосконалити системи управління вказаними пристроями.

Ключові слова: поліетилен; реологічні властивості; напруження зсуву; швидкість зсуву; температура.

Рис.: 3. Табл.: 1. Бібл.: 9.

Актуальність теми дослідження. Поліетилен знаходить дедалі більше застосування в різних галузях промисловості. Наприклад, у легкій, медичній та інших галузях поліетилен використовується як пакувальний або конструктивний матеріал. Реологічні властивості поліетилену впливають на якість продукції, яка виробляється. Тому знання цих властивостей впливає на методи проектування обладнання, яке виробляє матеріали з поліетилену, а також на систему управління технологічними процесами таких виробництв.

Постановка проблеми. При проектуванні обладнання для переробки поліетилену, а саме формуючих каналів екструдерів, плоскощілинних головок постає питання точного визначення його реологічних властивостей залежно від температури і швидкості зсуву. Залежно від вказаних реологічних властивостей змінюються геометричні розміри вказаних каналів. Вказані реологічні властивості здебільшого визначаються на підставі дослідів, які проводяться при визначених швидкостях зсуву і температурах. При проектуванні виникає потреба розрахувати геометричні розміри формуючих каналів при швидкостях зсуву і температурах, відмінних від експериментальних. Тому виникає потреба дослідити залежність напружень зсуву поліетилену від температури і швидкості зсуву.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Відомо [1-9], що реологічні властивості поліетилену значною мірою залежать від температури і швидкості зсуву. Реологічні властивості поліетилену досліджуються експериментально на приладах, які називаються віскозиметрами. У цих приладах поліетилен розігрівається до певної температури і при заданому зусиллі зсуву визначається швидкість витікання поліетилену із пристрою. Враховуючи, що вказані параметри значно впливають на реологічні властивості, то отримані в досліді результати представляють у виді графіків залежності напружень зсуву (τ) від швидкості зсуву ($\dot{\gamma}$) в логарифмічних координатах при певній температурі (рис. 1) [2; 4; 6-8].

Як видно із графіків, існують квантовані значення температур, при яких проводились досліді і температура значно впливає на напруження зсуву.

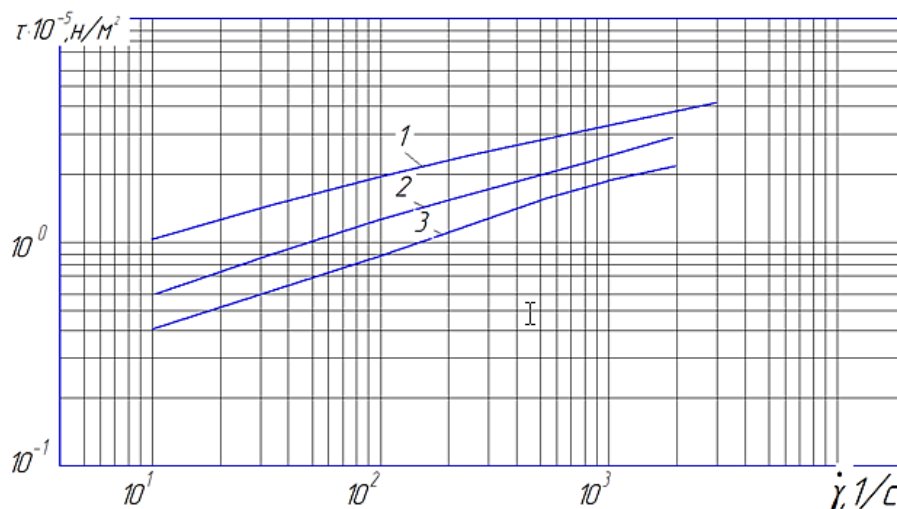


Рис. 1. Залежність напруження зсуву від його швидкості для поліетилену марки 15802-020: 1 – $T_1 = 120\text{ }^\circ\text{C}$; 2 – $T_2 = 150\text{ }^\circ\text{C}$; 3 – $T_3 = 180\text{ }^\circ\text{C}$

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Проведений аналіз останніх досліджень і публікацій показав, що відомі методи не дозволяють розрахувати реологічні властивості поліетилену при неквантованих температурах. Для отримання значень зусиль зсуву поліетилену від швидкості зсуву і температури, які не збігаються з квантованими експериментальними значеннями, у літературі відсутні рекомендації щодо їх визначення.

Метою статті є дослідження залежності напруження зсуву поліетилену від температури та швидкості зсуву й отримання аналітичного рівняння, що описує вказану залежність. Таке рівняння дозволить підвищити точність розрахунків обладнання для переробки поліетилену при його проектуванні, а також покращити систему управління вказаним обладнанням.

Виклад основного матеріалу. Розплавлений поліетилен є неньютонівською рідиною, і основне рівняння, що описує його поведінку при різних швидкостях зсуву, має вигляд [1-3]:

$$\tau = \mu_0 \bar{\lambda}^n = \mu_0 \left(\frac{dv}{dx} \right)^n, \tag{1}$$

де τ – напруження зсуву, Па;

μ_0 – «умовна» в'язкість, Па · с;

$\bar{\lambda}$ – швидкість зсуву, с^{-1} ;

n – індекс течії;

v – швидкість течії полімеру, м/с;

x – поточна координата, м.

На думку авторів [1; 5-9], доцільно вивчати в'язкість полімерів, використовуючи графічну залежність напруження від швидкості зсуву $\ln \tau = f(\ln \bar{\lambda})$ при різних значеннях температури в логарифмічних координатах (див. рис. 1).

Із графіків залежності напруження від швидкості зсуву в логарифмічних координатах для різних марок поліетилену [1-3] видно, що вони мають при різних температурах лінійну залежність, тому доцільно описати їх математичним виразом (1), який в логарифмічних координатах буде мати лінійну залежність виду:

$$\ln \tau = \ln \mu_0 + n \ln \bar{\lambda}. \tag{2}$$

Таким чином, для знаходження індексу течії n (тангенс кута нахилу прямих) потрібно мати дві точки на прямій графіка (рис. 1) при тій самій температурі:

$$n = \frac{\log \tau_1 - \log \tau_2}{\log \dot{\gamma}_1 - \log \dot{\gamma}_2}, \tag{3}$$

де τ_1, τ_2 – значення напружень зсуву в першій і другій точках;

$\dot{\gamma}_1, \dot{\gamma}_2$ – значення швидкості зсуву в першій і другій точках.

З рівняння (2) знайдемо «умовну» в'язкість μ_0 , яка залежить тільки від температури, як видно з рис. 1:

$$\ln \mu_0 = \ln \tau - n \ln \dot{\gamma}. \tag{4}$$

Використовуючи рівняння (4), розрахуємо умовну в'язкість μ_0 для різних температур (наприклад, для рис. 1 маємо 3 умовні в'язкості). Температурну залежність умовної в'язкості μ_0 від температури представимо у вигляді рівняння Арреніуса [1-4]:

$$\mu_0 = A \cdot e^{E/RT}, \tag{5}$$

де A – коефіцієнт, що залежить від виду полімеру;

E – енергія активації течії, Дж/моль;

R – газова стала ($R=8,314$ Дж/(моль·К));

T – температура, градус Кельвіна.

У рівнянні (5) невідомими є величини A і E , і для їх знаходження приведемо дане рівняння до виду:

$$E = \frac{R(\ln \mu_{01} - \ln \mu_{02})}{1/T_1 - 1/T_2}; \tag{6}$$

$$A = \frac{\mu_{01}}{e^{E/RT_1}}, \tag{7}$$

де μ_{01}, μ_{02} – умовні в'язкості при температурах T_1 та T_2 .

Для розрахунку індексу течії n , «умовної» в'язкості μ_0 для різних температур та швидкостей зсуву була розроблена програма, яка обробляє отримані експериментальні дані. У результаті розрахунків отримано залежності індексу течії n від температури для різних типів полімерів (рис. 2).

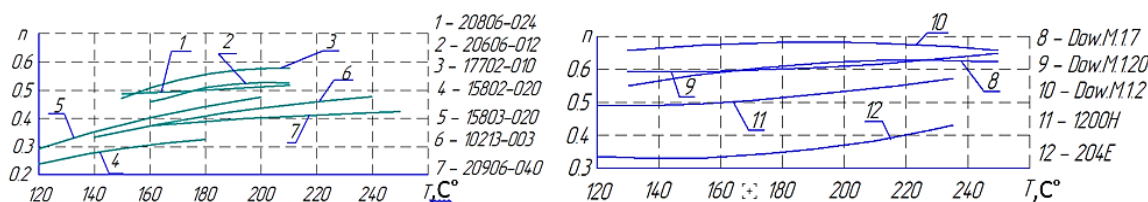


Рис. 2. Залежності індексу течії від температури для різних марок поліетилену

Як видно з графіків, індекс течії розплаву полімерів значною мірою залежить від температури та має нелінійний характер. На наш погляд, графіки можливо апроксимувати квадратичним рівнянням типу [3]:

$$n = c \cdot T^2 + d \cdot T + z, \tag{8}$$

де c, d, z – безрозмірні коефіцієнти.

Безрозмірні коефіцієнти c, d, z знаходимо за рівняннями для трьох різних температур:

$$d = \frac{(T_1^2 - T_2^2)(n_2 - n_3) - (T_2^2 - T_3^2)(n_1 - n_2)}{(T_1^2 - T_1^2)(T_2 - T_3) - (T_2^2 - T_3^2)(T_1 - T_2)}, \tag{9}$$

$$c = \frac{-d(T_1 - T_2) + (n_1 - n_2)}{(T_1^2 - T_1^2)}, \tag{10}$$

$$z = n_1 - c \cdot T_1^2 - d \cdot T_1 \tag{11}$$

де T_1, T_2, T_3 – температури у трьох різних точках;

n_1, n_2, n_3 – індекси течії у трьох різних точках температур.

Отримані результати розрахунку коефіцієнтів d, c, z і E дозволяють представити залежність напруження зсуву від його швидкості і температур у вигляді:

$$\tau = A \cdot e^{E/RT} \gamma^{-cT^2 + dT + z}. \tag{12}$$

Таким чином, рівняння (12) дозволяє розрахувати напруження зсуву від його швидкості та температури розплаву поліетилену. В інженерній діяльності прийнято використовувати формулу (1). Тому нами для кожної марки поліетилену отримано два рівняння для розрахунку умовної в'язкості й розрахунку індексу течії, які залежать від температури. Для кожного типу поліетилену рівняння представлені в таблиці 1. Порівняння даних отриманих за графіками, які наведені авторами [2; 3; 5-8], та розрахованих за рівняннями, наведеними в таблиці 1, показало, що похибка для марок поліетилену 1-7 із таблиці 1 не перевищує 2 %, а для марок 8-12 не перевищує 8 %.

Таблиця 1 – Рівняння для розрахунку умовної в'язкості й індексу течії від температури

№ р/р	Марка поліетилену	Рівняння для розрахунку умовної в'язкості від температури	Рівняння для розрахунку індексу течії від температури
1	Поліетилен 20806-024	$\mu_0 = 25.09 \cdot e^{20961.92/(R \cdot (273+T))}$	$n = 0.43 + 1.75 \cdot 10^{-4} \cdot T + 1.25 \cdot 10^{-6} \cdot T^2$
2	Поліетилен 20606-012	$\mu_0 = 49.69 \cdot e^{19439.02/(R \cdot (273+T))}$	$n = -0.53 + 1.02 \cdot 10^{-2} \cdot T - 2.50 \cdot 10^{-5} \cdot T^2$
3	Поліетилен 17702-010	$\mu_0 = 0.67 \cdot e^{34467.80/(R \cdot (273+T))}$	$n = -0.68 + 1.2 \cdot 10^{-2} \cdot T - 2.88 \cdot 10^{-5} \cdot T^2$
4	Поліетилен 15802-020	$\mu_0 = 9.81 \cdot e^{28517.42/(R \cdot (273+T))}$	$n = -0.34 + 7.08 \cdot 10^{-3} \cdot T - 1.90 \cdot 10^{-5} \cdot T^2$
5	Поліетилен 15803-020	$\mu_0 = 0.46 \cdot e^{37524.90/(R \cdot (273+T))}$	$n = -0.20 + 5.26 \cdot 10^{-3} \cdot T - 9.53 \cdot 10^{-6} \cdot T^2$
6	Поліетилен 10213-003	$\mu_0 = 9.10 \cdot e^{29608.29/(R \cdot (273+T))}$	$n = -5.75 \cdot 10^4 + 3.62 \cdot 10^3 \cdot T - 5.69 \cdot 10^6 \cdot T^2$
7	Поліетилен 20906-040	$\mu_0 = 295.30 \cdot e^{15489.49/(R \cdot (273+T))}$	$n = 0.13 + 2.05 \cdot 10^{-3} \cdot T - 3.55 \cdot 10^{-6} \cdot T^2$
8	Поліетилен 204Е	$\mu_0 = 40.61 \cdot e^{23708.08/(R \cdot (273+T))}$	$n = 0.55 - 3.14 \cdot 10^{-3} \cdot T + 1.11 \cdot 10^{-5} \cdot T^2$
9	Поліетилен 1200Н	$\mu_0 = 0.89 \cdot e^{30167.21/(R \cdot (273+T))}$	$n = 0.62 - 2.02 \cdot 10^{-2} \cdot T + 7.70 \cdot 10^{-6} \cdot T^2$
10	Поліетилен Dow. M.1.2.	$\mu_0 = 5.72 \cdot e^{23478.90/(R \cdot (273+T))}$	$n = 0.45 + 2.47 \cdot 10^{-3} \cdot T - 6.55 \cdot 10^{-6} \cdot T^2$
11	Поліетилен Dow. M.1.20.	$\mu_0 = 0.77 \cdot e^{27868.77/(R \cdot (273+T))}$	$n = 0.59 - 1.60 \cdot 10^{-4} \cdot T + 1.61 \cdot 10^{-6} \cdot T^2$
12	ПВХ (рецептура 60)	$\mu_0 = 5.58 \cdot e^{30434.59/(R \cdot (273+T))}$	$n = 0.30 + 6.62 \cdot 10^{-4} \cdot T - 6.83 \cdot 10^{-6} \cdot T^2$

Слід зауважити, що рівняння (12), або рівняння з таблиці 1 дозволяють побудувати в просторових координатах у вигляді поверхні (рис. 3) напруження зсуву від його швидкості та температури. Як видно із рис. 3, поверхня має складний просторовий вигляд.

Отримане рівняння дозволяє розрахувати реологічні властивості різних марок поліетилену при заданих температурах і швидкостях зсуву. Це важливо при проектуванні екструдерів, плоскощілинних головок або при управлінні обладнанням для переробки поліетилену.

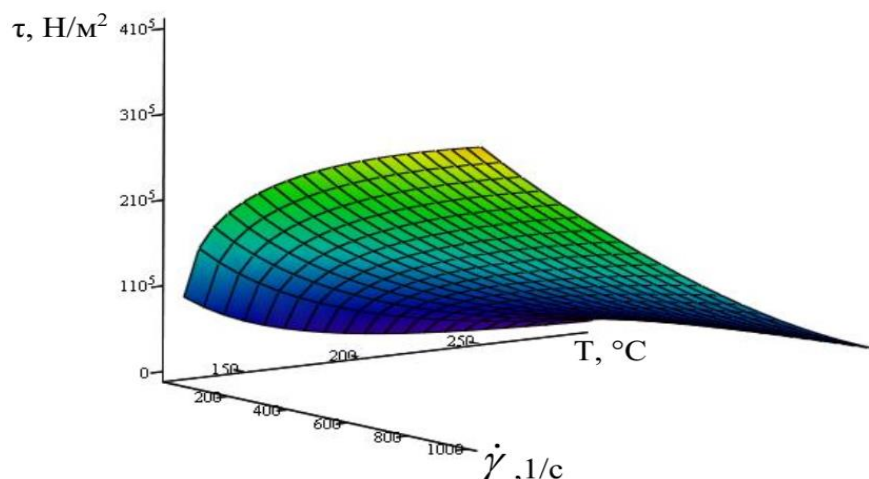


Рис. 3. Просторовий графік залежності напруження зсуву поліетилену марки 15802-020 від його швидкості і температури

Наприклад, для поліетилену марки 15802-020 з реологічними властивостями наведеними на рис. 1 з температурою $T = 135\text{ }^{\circ}\text{C}$ і постійному напруженні зсуву $\tau = 105000\text{ Н/м}^2$ розрахунок швидкості зсуву, прийнятий як середнє між температурами $T = 125\text{ }^{\circ}\text{C}$ і $T = 150\text{ }^{\circ}\text{C}$, що дає значення $\dot{\gamma} = 32,5\text{ с}^{-1}$. Це на 28,4 % більше, ніж розраховане за формулою (12) значення $\dot{\gamma} = 25,3\text{ с}^{-1}$. Така помилка призведе до того, що система управління підвищить швидкість обертання валків, які витягують плівку й товщина останньої в результаті буде на 28,4 % тонше, ніж потрібно.

Висновки. На основі проведених досліджень отримано аналітичне рівняння, яке дозволяє розрахувати напруження зсуву поліетилену від його швидкості зсуву й температури. Отримані результати дозволять підвищити як точність проектування обладнання для переробки поліетилену, так і систему управління вказаним обладнанням.

Список використаних джерел

1. Influence of polymer structure and amount on microstructure and properties of polyethylene-modified asphalt binders / K. L. Roja, A. Rehman, M. Ouederni, S.K. Krishnamoorthy, A. Abdala, E. Masad // Materials and Structures. – 2021. – Vol. 54. – Pp. 91. – DOI: <https://doi.org/10.1617/s11527-021-01683-0>.
2. Thermomechanical properties of composites and their vulcanizates based on high density polyethylene and copper / K.V. Allahverdiyeva, N.T. Kakhramanov, M.I. Abdulin, F.A. Mustafayeva // New Materials, Compounds and Applications. – 2020. – Vol. 4(2). – P. 141.
3. Areview of Asphalt Modification Using Plastics: A Focus on Polyethylene [Electronic resource] / Masad E., Roja K.L., Rehman A., Abdala A. – 2020. – Accessed mode: <https://www.researchgate.net/publication/341152175>.
4. Comparison of rheological properties and compatibility of asphalt modified with various polyethylene / M. Liang, X. Xin, W. Fun, J. Zhang, Z. Yao // Int j Pavem Eng. – 2019. – Pp. 1-10.
5. Saroufim E. A simple interpretation of the effect of the polimer type on the properties of PMBs for road paving applications / E. Saroufim, C. Celauro, M.C. Mistretta // Constr Build Mater. – 2018. – Vol. 158. – Pp. 114-123.
6. Яхно О. М. Основы реологии полимеров / О. М. Яхно, В. Ф. Дубовицкий. – К. : Вища школа, 1976. – 188 с.
7. Яхно О. М. Гідраліка неньютонівських рідин / О. М. Яхно, В. І. Желяк. – К. : Вища школа, 1995. – 199 с.
8. Чередніченко П. І. Плоскощілинні головки для ламінування матеріалів. Конструкція, розрахунок, проектування : монографія / П. І. Чередніченко, В. Г. Бакалов, О. В. Бакалов. – Чернігів, 2009. – 141 с.
9. Michaeli W., Kaul S., Wolff T. Computer-aided optimization of extrusion dies / W. Michaeli, S. Kaul, T. Wolff // Journal of Polymer Processing. – 2001. – Vol. 21. – Pp. 225-237.

References

1. Roja, K. L., Rehman, A., Ouederni, M., Krishnamoorthy, S.K., Abdala, A., Masad, E. (2021). Influence of polymer structure and amount on microstructure and properties of polyethylene-modified asphalt binders. *Materials and Structures*, 54, 91. <https://doi.org/10.1617/s11527-021-01683-0>.
2. Allahverdiyeva, K.V., Kakhramanov, N.T., Abdulin, M.I., Mustafayeva, F.A. (2020). Thermomechanical properties of composites and their vulcanizates based on high density polyethylene and copper. *New Materials, Compounds and Applications*, 4(2), 141.
3. Masad, E., Roja, K.L., Rehman, A., Abdala, A. (2020). A review of Asphalt Modification Using Plastics: A Focus on Polyethylene. <https://www.researchgate.net/publication/341152175>.
4. Liang, M., Xin, X., Fun, W., Zhang, J., Yao, Z. (2019). Comparison of rheological properties and compatibility of asphalt modified with various polyethylene. *Int j Pavem Eng*, 1-10.
5. Saroufim, E., Celauro, C., Mistretta, M.C. (2018). A simple interpretation of the effect of the polymer type on the properties of PMBs for road paving applications. *Constr Build Mater*, 158, 114-123.
6. Yakhno, O.M., Dubovitsky, V.F. (1976). *Osnovy reologii polimerov [Fundamentals of polymer rheology]*. Higher school.
7. Yakhno, O.M., Zhelyak, V.I. (1995). *Hidravlika neniutonivskykh ridyn [Hydraulics of non-Newtonian fluids]*. Higher school.
8. Cherednichenko, P.I., Bakalov, V.G., Bakalov, O.V. (2009). *Ploskoshchilynni holovky dlia laminuvannia materialiv. Konstruktsiia, rozrakhunok, proektuvannia [Flat slotted heads for lamination of materials. Construction, calculation, design]*. Chernihiv.
9. Michaeli, W., Kaul, S., Wolff, T. (2001). Computer-aided optimization of extrusion dies. *Journal of Polymer Processing*, 21, 225-237.

Отримано 30.05.2022

UDC 621.923.42

Valery Bakalov¹, Victor Kuzmenko², Igor Yarish³

¹PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Research Fellow of the State Research Institute for Testing and Certification of Weapons and Military Equipment (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: bakalov1972@ukr.net. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-8602-7778>. **ResearcherID:** [J-1337-2014](https://orcid.org/0000-0002-8602-7778)

²Head of the Research Department of the State Research Institute for Testing and Certification of Arms and Military Equipment (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: dbnrjh.z@ukr.net. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-8008-4299>. **ResearcherID:** [GLQ-8442-2022](https://orcid.org/0000-0001-8008-4299)

³ Research Fellow of the State Research Institute for Testing and Certification of Weapons and Military Equipment (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: peredaha0983@ukr.net. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-0212-0466>. **ResearcherID:** [GLQ-7481-2022](https://orcid.org/0000-0002-0212-0466)

STUDY OF THE DEPENDENCE OF SHEAR STRESSES OF POLYETHYLENE ON TEMPERATURE AND SHEAR VELOCITY

Polyethylene is increasingly used in various industries such as light, medical and others as a variety of packaging and structural materials. Rheological properties of polyethylene affect products quality. Therefore, knowledge of these properties affects the calculation methods of equipment that produces materials from polyethylene, as well as the control system of technological processes of such industries.

When designing equipment for processing polyethylene, namely the forming channels of extruders, flat slotted heads, the question of accurate determination of its rheological properties depending on the temperature and shear rate arises. Depending on the specified rheological properties the geometrical sizes of the specified channels change. These rheological properties are usually determined on the basis of experiments conducted at certain shear rates and temperatures. When designing, there is a need to calculate the geometric dimensions of the forming channels at shear rates and temperatures other than experimental. Therefore, there is a problem of developing a method of calculating these dimensions on the basis of experimental data obtained at other shear rates and temperatures.

On the basis of the conducted research, the equation of the dependence of the shear stress of polyethylene on its shear rate and temperature was obtained. In the equation, the shear stress is directly proportional to the conditional viscosity and the shear rate gradient in power, which is the flow index. It is shown that the conditional viscosity of polyethylene is well described by the Arrhenius equation, and the flow index has a quadratic dependence on temperature. The obtained generalized equation of shear stress of polyethylene from its shear rate and temperature will allow to more accurately calculate the geometric dimensions of the forming channels of extruders, slotted heads, as well as to improve control systems for these devices.

Keywords: polyethylene; rheological properties; shear stress; shear rate; temperature.

Fig.: 3. **Table:** 1. **References:** 9.