

## Зависимость энергозатрат насосов в напорных полиэтиленовых трубопроводах от величин их фактического внутреннего диаметра

О. А. Продоус, генеральный директор ООО «ИНКО-Инжиниринг»

Л. Д. Терехов, заместитель генерального директора ООО «ИНКО-инжиниринг»

Различные технологии производства напорных и высоконапорных полиэтиленовых труб предусматривают классификацию типоразмеров выпускаемой продукции по разным параметрам — *SDR* и *SIDR*, характеризующих отношение номинального наружного или внутреннего диаметра труб к толщине их стенки. Вследствие чего для одних и тех же труб их внутренний диаметр при разных технологиях производства — различный, а энергозатраты насосов — существенно отличаются.

**Ключевые слова:** полиэтиленовые трубы, технологии производства, типоразмеры, гидравлические характеристики, энергозатраты.

Существуют две разные классификации типоразмеров полиэтиленовых труб: по стандартному размерному соотношению — *SDR*, равному отношению номинального наружного диаметра  $d_H$  к толщине стенки трубы  $e$  (рис. 1):

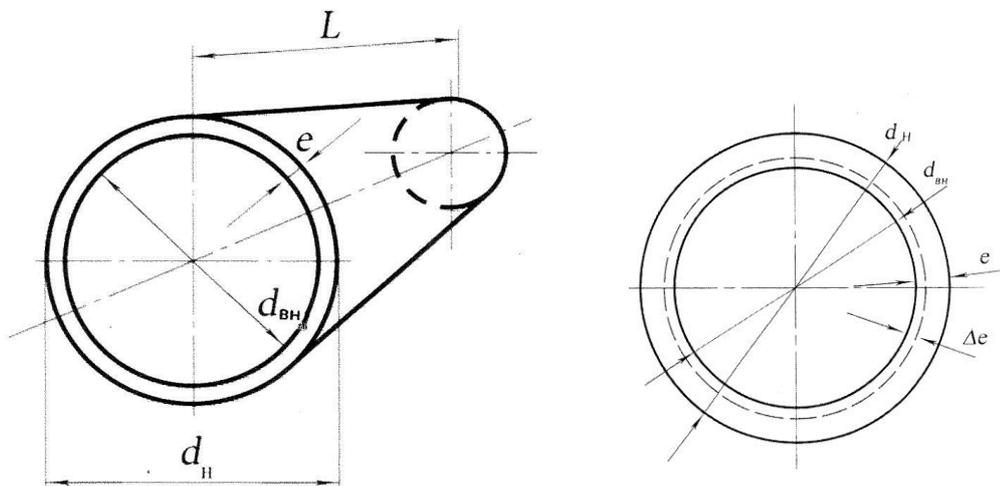


Рис. 1. Геометрические характеристики труб

$$SDR = \frac{d_H}{e} = \frac{d_{вн} + 2e}{e} = \frac{d}{e} + 2,$$

где:

$d_{вн}$  — номинальный внутренний диаметр;

$e$  — номинальная толщина стенки;

$L$  — длина трубы, м,

и по стандартному размерному соотношению  $SIDR$ , равному отношению номинального внутреннего диаметра трубы  $d_{вн}$  к номинальной толщине стенки  $e$ :

$$SIDR = \frac{d_{вн}}{e} = \frac{d_n - 2e}{e} = \frac{d_n}{e} - 2 = SDR - 2$$

или  $SDR = SIDR + 2$ .

Обе классификации типоразмеров труб разработаны для возможности характеризовать полиэтиленовые трубы, выпускаемые по двум принципиально разным технологиям: методом напорной экструзии через калибр (показатель  $SDR$ ) и методом намотки на предварительно нагретый металлический барабан композитного слоя из смеси ПЭ 100, резаного стекловолокна и связующего материала в соотношении по массе 78% x 20% x 2% по технологии фирмы KAT GmbH, Германия (показатель  $SIDR$ ). Такая технология позволяет за счет использования композитной смеси (ПЭ, плюс стекловолокно) снижать долю ПЭ 100, что способствует увеличению давления в трубах и уменьшению стоимости готовой трубы [3].

Кроме того, при фиксированном наружном диаметре металлического барабана, на который наматывается композитный слой, на него можно наматывать практически любую толщину композитных слоев, обеспечивая этим увеличение давления в трубах, которое заведомо будет выше, чем в трубах, изготовленных по первой технологии.

При производстве напорных полиэтиленовых труб по любой из двух приведенных технологий нормативными требованиями для этих технологий установлены технологические допуски, в соответствии с действующими стандартами [1, 2], на наружный (или внутренний) диаметр труб и толщину их стенки. В работе [4] показано влияние заложенных в стандарт ГОСТ 18599-2011 ограничений по толщине стенок труб на величины их внутренних диаметров и гидравлические характеристики, а также отмечено, что чем больше внутренний диаметр  $d_{вн}$ , тем меньше удельные потери  $1000 i$  по длине трубопровода и, соответственно, затраты электроэнергии на перекачку жидкости на расстояние.

Подтвердим этот вывод на конкретном примере для труб одного и того же номинального диаметра, изготовленных по приведенным выше технологиям, характеризуемых параметрами  $SDR$  и  $SIDR$ . В табл. 1 приведены геометрические, гидравлические и энергетические характеристики труб  $SDR 17$ ,  $SIDR 10$  ( $SDR 12$ ) с диаметром  $d_n = 500$  мм, PN10, изготовленных по двум технологиям для обычных условий строительства —  $C = 1,25$  [5], по которым транспортируется расход  $q = 0,16$  м<sup>3</sup>/с (160 л/с). Для расчетов приняты размеры труб по

действующим стандартам с учетом технологических допусков на наружный (внутренний) диаметр труб и толщину их стенки при температуре  $t = 10 \text{ }^\circ\text{C}$  ( $\nu = 0,00000131 \text{ м}^2/\text{с}$ ) [1, 2].

Потери напора в трубах из полимерных материалов определяются по формуле Дарси-Вейсбаха, имеющей вид [5]:

$$i = \lambda \frac{V^2}{2g \cdot d_{\text{вн}}}, \quad (1)$$

где:

$\lambda$  — коэффициент гидравлического сопротивления трения по длине;

$d_{\text{вн}}$  — расчетный внутренний диаметр труб, м;

$V$  — скорость напорного потока, м/с;

$$V = \frac{4 \cdot q}{\pi \cdot d_{\text{вн}}^2}, \text{ м/с} \quad (2)$$

$$d_{\text{вн}} = d_{\text{н}} - 2e,$$

где:

$q$  — заданный расход, м<sup>3</sup>/с (л/с);

$d_{\text{н}}$  — наружный диаметр, м;

$e$  — толщина стенки трубы, м.

Преобразовав формулу (1) с помощью формулы (2), увидим, что величина потерь напора по длине трубопровода обратно пропорциональна фактическому внутреннему диаметру  $d_{\text{вн}}^\Phi$ , зависящему от толщины стенки труб  $e$  в пятой степени:

$$i = \lambda \frac{16 \cdot q^2}{2g \cdot \pi \cdot (d_{\text{вн}}^\Phi)^5}. \quad (3)$$

То есть, чем меньше толщина стенки трубы  $e$ , обеспечивающая заданное давление, тем меньше потери напора по длине трубопровода  $h$  и меньше энергопотребление насосов на перекачку заданного расхода  $q$ .

Коэффициент гидравлического сопротивления  $\lambda$  определяется согласно нормативному документу [6] по упрощенной формуле, подробно рассмотренной в справочном пособии [5] на конкретных примерах:

$$\lambda = \left[ \frac{0,5 \left( \frac{b}{2} + \frac{1,312 (2 - b) \cdot m}{n} \right)}{m} \right]^2, (4)$$

где:

$b = 1 + \frac{\lg Re_\phi}{\lg Re_{кв}}$  — некоторое число подобия режимов движения жидкости. При условии  $b > 2$  значение  $b$  принимается равным 2;

$Re_\phi = \frac{V \cdot d_{вн}}{\nu}$  — фактическое число Рейнольдса;

$\nu$  — коэффициент кинематической вязкости воды, м<sup>2</sup>/с, принимаемый для расчета  
 $\nu = 1,31 \times 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с при температуре воды + 10 °С;

$Re_{кв} = \frac{500 \cdot d_{вн}}{2Ra^{1,33}}$  — число Рейнольдса, соответствующее началу квадратичной области гидравлических сопротивлений;

$Ra$  — интегральная высотная характеристика шероховатости стенок труб, измеряемая прибором, — среднеарифметическое абсолютное значение отклонений профиля в пределах базовой длины, м (мкм) [5];

$m = \lg \frac{3,7 \cdot d_{вн}}{2Ra^{1,33}}$  — число подобия параметров трубопровода, отражающее изменение расчетного внутреннего диаметра и значения величины измеренной шероховатости стенок труб;

$n = \lg Re_\phi - 1$  — фактор, характеризующий изменение расхода транспортируемого потока жидкости, в зависимости от ее физических свойств.

Энергозатраты двигателей насосов в трубах с различным внутренним диаметром (табл. 1, 2) определяются по формуле [7]:

$$N_{дв} = 10^6 \cdot i(d_{вн})^2 \cdot V \cdot \frac{0,00808}{\eta}, \text{ кВт}, (5)$$

где:

$i$  — удельные потери напора на трение, мм/м;

$d_{вн}$  — внутренний диаметр труб, м;

$V$  — скорость напорного потока, м/с;

$\eta$  — КПД насосной установки. Для расчетов принимают  $\eta = 0,7$ .

Разность энергозатрат двигателей насосов на 1 км трубопровода за счет использования труб с различным внутренним диаметром определяется по формуле [7]:

$$\Delta N_{\text{дв}} = 10^6 (i_1 - i_2) \cdot d_{\text{вн}}^2 \cdot V \frac{0,00808}{\eta}, \text{ кВт/ч (6)}$$

где:

$i_1$  — гидравлический уклон для труб, изготовленных по ГОСТ 18599-2001;

$i_2$  — гидравлический уклон для труб, изготовленных по СТ РК ISO 4427-1-2014;

$d_{\text{вн}}$  — внутренний диаметр трубы большого диаметра, м;

$V$  — скорость потока в трубе с большим диаметром, м/с.

Геометрические, гидравлические и энергетические характеристики труб

Таблица 1.

Материал труб по стандарту	Диаметры труб			Расход $q$ , м <sup>3</sup> /с		Скорость потока $V$ , м/с		Гидравлические характеристики труб				Энергозатраты насоса	
	номинал наружный $d_n$ , мм	номинал внутренний $d_{вн}$ , мм	фактич. с учетом допусков $d_\phi$	расчетный	фактический	расчетная	фактическая	$\lambda^*$		1000 $i$ , мм/м		Ндв., кВт/ч	
								расчетные	фактически	расчетные	фактически	расчетные	фактические
ПЭ 100 по ГОСТ 18599-2001, SDR17	500	440,6	437,5	0,160	0,161	1,05	1,07	0,0150	0,0147	1,913	1,834	4,484	5,316
Композит по DIN SPEC 19674-2:2011-02 SDR 10 (SDR12)	610,4	500,0	505,2	0,160	0,164	0,80	0,82	0,0154	0,0153	1,000	1,050	2,413	2,524

\*расчет по формулам 1, 4, 5, 6 [6, 7]

$\Delta N_{дв}$ , кВт/ч (по формуле 6) для данных табл. 1	19,09	1,841
---	-------	-------

$$\Delta N_{дв}^{расчетн} = 10^6 (0,00913 - 0,00100) \cdot 0,5052^2 \cdot 0,80 \cdot 0,0115 = 19,090 \text{ кВт/ч,}$$

$$\Delta N_{дв}^{фактич} = 10^6 (0,001834 - 0,001050) \cdot 0,5052^2 \cdot 0,80 \cdot 0,0115 = 1,841 \text{ кВт/ч,}$$



В табл. 2 приведены гидравлические и энергетические параметры труб с различным внутренним диаметром для разных скоростей транспортируемого потока. По данным табл. 2 построены графики зависимости, приведенные на рис. 2,

$$N_{дв} = f(d_{вн}^{\phi}, i^{\phi}).$$

Гидравлические и энергетические характеристики труб разного диаметра Таблица 2.

Внутренний диаметр труб, $d_{вн}$ , м	Расчетные параметры	Расчетная скорость потока, V, м/с				
		0,5	1,0	1,5	2,0	2,5
0,4375 с учетом допусков	$\lambda$	0,0169	0,0154	0,0145	0,0139	0,0136
	1000 $i$ , мм/м	0,493	1,79	3,79	6,41	12,49
	$N_{дв}$ , кВт/ч	0,542	3,940	12,514	28,560	54,613
0,4406	$\lambda$	0,0131	0,0153	0,0144	0,0139	0,0136
	1000 $i$ , мм/м	0,476	1,77	3,75	6,41	9,83
	$N_{дв}$ , кВт/ч	0,531	3,951	12,551	28,631	54,838
0,500	$\lambda$	0,0165	0,0148	0,0141	0,0136	0,0133
	1000 $i$ , мм/м	0,421	1,50	3,23	5,53	8,47
	$N_{дв}$ , кВт/ч	0,605	4,326	13,946	31,826	60,896
0,5052 с учетом допусков	$\lambda$	0,0164	0,0147	0,0140	0,0135	0,0132
	1000 $i$ , мм/м	0,414	1,48	3,19	5,46	8,35
	$N_{дв}$ , кВт/ч	0,607	4,350	14,000	34,997	61,304

Анализ данных, приведенных в табл. 2, показывает следующее:

— удельные потери напора в трубах, за счет влияния технологических допусков на толщину стенки труб, с наименьшим фактическим внутренним диаметром  $d_{вн}^{\phi} = 0,4375$  м, в зависимости от скорости потока  $V = 0,5 \div 2,5$  м/с изменяются в диапазоне  $1000 i = 0,493$  мм/м  $\div$   $12,490$  мм/м, т. е. на 96,05%, или в 25,3 раза.

Вследствие этих изменений также существенно изменяются энергозатраты насосов с  $N_{дв} = 0,542$  кВт/ч до  $N_{дв} = 54,613$  кВт/ч, то есть на 99,0%, или в 100,8 раза;

— аналогично, в трубах с наибольшим фактическим внутренним диаметром  $d_{вн}^{\phi} = 0,5052$  м

за счет влияния технологических допусков при производстве труб, в зависимости от скорости потока  $V = 0,5 \div 2,5$  м/с, изменяются значения удельных потерь напора в диапазоне

$1000 i = 0,414 \text{ мм/м} \div 8,35 \text{ мм/м}$ , то есть на 95,04%, или в 20,17 раза.

Энергозатраты насосов являются величиной, значение которой зависит от величины фактического внутреннего диаметра труб  $d_{\text{вн}}^{\Phi}$  и фактических потерь напора по длине  $i^{\Phi}$ . Это наглядно представлено в табл. 2 и на рис. 2.

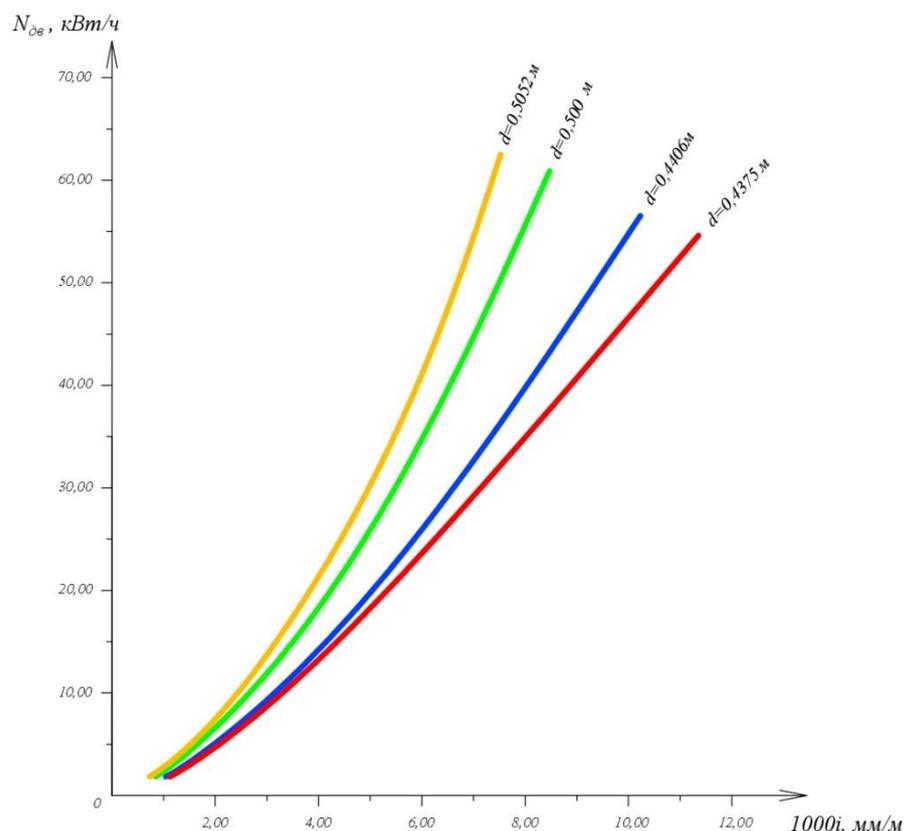


Рис. 2. Зависимость энергопотребления насосов от значений фактических внутренних диаметров труб,  $N_{\text{дв}} = f(d_{\text{вн}}^{\Phi}, i^{\Phi})$

Энергозатраты насосов в трубопроводе с наименьшим внутренним диаметром  $d_{\text{вн}}^{\Phi} = 0,4375 \text{ м}$  при скоростях потока  $V = 0,5 \div 2,5 \text{ м/с}$  изменяются в диапазоне:  $N_{\text{дв}} = 0,542 \text{ кВт/ч} \div 54,613 \text{ кВт/ч}$ , то есть на 99%, или 100,8 раза.

Аналогично, энергозатраты насосов в трубопроводе с наибольшим внутренним диаметром  $d_{\text{вн}}^{\Phi} = 0,5052 \text{ м}$  при скоростях потока  $V = 0,5 \div 2,5 \text{ м/с}$  изменяются в диапазоне значений:  $N_{\text{дв}} = 0,607 \text{ кВт/ч} \div 61,304 \text{ кВт/ч}$ , то есть на 99%, или 101,0 раза.

Разность энергозатрат двигателей насосов в диапазоне скоростей  $V = 0,80 \div 1,07 \text{ м/с}$  (табл. 1) составляет:  $N_{\text{дв}}^{\text{расч}} = 19,090 \frac{\text{кВт}}{\text{ч}}$ , а  $N_{\text{дв}}^{\text{факт}} = 1,841 \text{ кВт/ч}$ . То есть фактические

энергозатраты насосов в диапазоне указанных скоростей на 90,36% меньше, чем расчетные, т. е. в 10,37 раза.

Таким образом, проведенный анализ гидравлических и энергетических характеристик насосов для полиэтиленовых труб с различным внутренним диаметром убедительно свидетельствует о том, что перед технологами и специалистами трубных производств должны быть поставлены вопросы о необходимости проработки технических и технологических задач, результатом решения которых станет выпуск трубной продукции в расширенном диапазоне значений по внутреннему диаметру труб (SDR), отличных от выпускаемых по ГОСТ 18599-2001.

Увеличение внутренних диаметров полиэтиленовых труб по ГОСТ 18599-2001, за счет совершенствования технологии их производства, будет способствовать также эффективному выполнению Федерального закона от 23 ноября 2009 г. № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» [8].

## Литература

1. СТ РК ISO4427-1-2014 Трубы полиэтиленовые и фитинги для водоснабжения. Часть 1. Общие положения. // <http://nd.gostinfo.ru/document/6107845.aspx>
2. ГОСТ 18599-2001 Трубы напорные из полиэтилена. Технические условия. // М.: ИПК Издательство стандартов, 2002. // <http://docs.cntd.ru/document/1200029492>
3. Продоус О. А. Современные инновационные технологии производства напорных и высоконапорных труб для систем водоснабжения. // «Трубопроводы и экология», № 2, 2011. — С. 15.
4. Продоус О. А. Влияние величины внутреннего диаметра труб напорных из полиэтилена на значение потерь напора по длине. // Журнал «Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение». 2018/6 (126). — С. 14–19.
5. Продоус О. А. Таблицы для гидравлического расчета труб напорных из полиэтилена. Справочное пособие. Издание 3-е — дополненное. // СПб.: ООО «Свое издательство», 2017. — 240 с. ил.
6. СП 40-102-2000 Проектирование и монтаж трубопроводов систем водоснабжения и канализации из полимерных материалов. Общие требования. // <http://docs.cntd.ru/document/1200007490>

7. Продоус О. А. Об энергопотреблении насосов в трубопроводах из полимерных материалов. // Журнал «Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение». 2017/12 (120). — С. 36–38.
8. Федеральный закон «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» от 23 ноября 2009 года № 261-ФЗ (ред. от 03.08.2018) // <https://fzrf.su/zakon/ob-ehnergoberezhonii-261-fz>