

ОЦЕНКА ЭКОНОМИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ПРИ ПРИМЕНЕНИИ ПРОТИВОТУРБУЛЕНТНЫХ ПРИСАДОК НА НЕФТЕПРОВОДЕ

Докт. техн. наук, проф. АНИЩЕНКО В. А.

Белорусский национальный технический университет

Канд. техн. наук, доц. ТОКОЧАКОВА Н. В., инж. ФИКОВ А. С.

Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого

Для предприятий транспорта нефти актуальна оценка экономии электрической энергии (ЭЭ) за счет проведения мероприятий, направленных на улучшение технологических показателей транспортировки нефти, поскольку 98,5 % общего потребления ТЭР приходится на ЭЭ технологических нужд.

Одним из мероприятий, улучшающим как технологические, так и энергетические показатели режимов транспортировки нефти, является добавление в транспортируемую нефть противотурбулентных присадок. Противотурбулентные присадки представляют собой высокомолекулярные полимеры, которые в транспортируемой нефти снижают гидравлическое сопротивление нефтепровода. К наиболее ранним опубликованным данным по снижению гидравлического сопротивления за счет применения противотурбулентных присадок относится работа английского химика Томса (эффект Томса) [1]. Исследования [2–4] посвящены изучению факторов, влияющих на эффективность противотурбулентной присадки. Установлено, что к основным факторам относятся: концентрация противотурбулентной присадки в общем объеме чистого растворителя, молекулярная масса противотурбулентной присадки, растворимость полимера в нефти. В условиях роста указанных факторов эффективность противотурбулентной присадки увеличивается. Наибольший эффект снижения гидравлического сопротивления дают противотурбулентные присадки с линейно вытянутыми молекулами и молекулярной массой более 10^6 а. е. м. Изменение скорости потока нефти значительного влияния на эффективность присадки не оказывает.

В процессе исследований [3, 4] установлен механизм действия противотурбулентных присадок: при добавлении полимера в поток жидкости его молекулы полностью раскручиваются и растягиваются потоком, в результате чего данный поток жидкости ламинаризуется. Незначительное разрушение присадки начинает происходить в процессе ее продвижения по нефтепроводу за счет подавления турбулентности потока, а также при прохождении раствора присадки через повороты и ответвления нефтепровода. При прохождении присадки через магистральный насосный агрегат раскрученные молекулы полимера полностью разрушаются, и на участке нефтепровода после нефтеперекачивающей станции «эффект Томса» не наблюдается. Эффективность присадки для разных участков нефтепровода различна,

поскольку на ее разрушение влияют геометрические особенности участка нефтепровода (лупинги, перемычки, протяженность).

Для количественной оценки эффективности противотурбулентной присадки используется выражение [4]

$$\psi = 1 - \frac{\lambda_c}{\lambda_0}, \text{ о. е.}, \quad (1)$$

где ψ – коэффициент эффективности присадки, о. е.; λ_0 – коэффициент гидравлического сопротивления до добавления противотурбулентной присадки; λ_c – коэффициент гидравлического сопротивления после добавления противотурбулентной присадки.

Коэффициент эффективности присадки показывает долю снижения гидравлического сопротивления нефтепровода от добавления противотурбулентной присадки при его неизменной производительности. В настоящее время максимальная эффективность противотурбулентной присадки при значительной величине ее концентрации может достигать 60–70 %.

Применение противотурбулентных присадок позволяет: уменьшать давление в нефтепроводе при проведении ремонтных работ без снижения производительности; обеспечивать кратковременное или длительное повышение производительности нефтепровода для выполнения производственной программы; увеличивать пропускную способность лупинга при выводе в ремонт участка основного нефтепровода и наоборот. Таким образом, добавление противотурбулентных присадок прежде всего направлено на увеличение пропускной способности нефтепровода за счет уменьшения его гидравлического сопротивления. Снижение гидравлического сопротивления увеличивает эквивалентный диаметр (ЭД) нефтепровода, который, в свою очередь, влияет на удельный расход ЭЭ. Поэтому добавление противотурбулентных присадок можно рассматривать с точки зрения не только увеличения пропускной способности нефтепровода, но и создания условий для экономии ЭЭ.

Анализ научных публикаций по данной тематике [1, 2, 4–6] показал, что оценка эффективности противотурбулентных присадок рассматривается лишь с точки зрения технологических показателей транспортировки нефти, а способы оценки возможной экономии ЭЭ от их применения отсутствуют.

Для разработки способа оценки экономии ЭЭ от применения противотурбулентных присадок использовались результаты опытно-промышленных испытаний присадки FLO XL компании Baker Petrolite, которые проводились в декабре 2004 г. на участке Бобовичи – Защебье двухниточного нефтепровода Унеча – Мозырь с целью изучения возможности организации технологического режима с более высокой производительностью. Протяженность данного участка нефтепровода составляет 73 км, диаметры первой и второй нитки – соответственно 820 («Дружба-1») и 1020 мм («Дружба-2»).

Ввод присадки производился на выкиде нефтеперекачивающей станции (НПС) Бобовичи в двух дозировках: 30 л/ч на нитке «Дружба-1»; 30 и

40 л/ч – на нитке «Дружба-2». Регистрация расхода нефти и давления осуществлялась через каждый час испытаний.

Заполнение присадкой нитки «Дружба-1» началось в 18.00 02.12.2004. Через 9 ч присадка полностью распространилась по участку нефтепровода, при этом ввод присадки продолжался до 8.00 03.12.2004. Фактическая концентрация присадки составила 6,5 г на 1 т нефти. В ходе испытаний гидравлическое сопротивление участка снизилось на 16,1 %. Дальнейшее добавление присадки было прекращено из-за дросселирования на всасе НПС «Зашебье».

3 декабря 2004 г. в 15.30 начался ввод присадки на участке «Дружба-2» с дозировкой 30 л/ч. Примерно в 24.00 того же дня присадка полностью заполнила данный участок при фактической концентрации 4,8 г/т. Ввод присадки был прекращен в связи с глубоким дросселированием на НПС «Бобовичи». В ходе испытаний снижение гидравлических сопротивлений было зафиксировано на отметке 14,7 %.

Дальнейшие испытания на участке «Дружба-2» продолжились в 15.50 7.12.2004. Присадка вводилась в поток нефти в объеме 40 л/ч и к 24.00 того же дня полностью распространилась по участку нефтепровода. Снижение гидравлического сопротивления составило 17,8 % при фактической концентрации присадки 6,4 г/т. Добавление присадки было продолжено вплоть до 10.12.2004, при этом были включены в работу дополнительные агрегаты (НПС «Унеча» и НПС «Новозыбков»).

Результаты испытаний противотурбулентной присадки FLO XL приведены в табл. 1.

По результатам эксперимента построена зависимость эффективности присадки от ее концентрации (рис. 1). Как видно, при увеличении концентрации присадки наблюдается снижение прироста ее эффективности. Соответственно и рентабельность использования присадки при увеличении ее концентрации также будет снижаться.

В основу оценки экономии ЭЭ от использования противотурбулентной присадки положена математическая модель расхода ЭЭ W на транспортировку нефти по нефтепроводу на выбранном интервале грузооборота [7], позволяющая выявить влияние параметра d_3 на режим электропотребления:

$$W = \beta_p P + \beta_v v + \beta_d d_3 + \beta_0, \text{ кВт} \cdot \text{ч/сут.}, \quad (2)$$

где β_p – коэффициент регрессии, кВт · ч/(тыс. т · км); β_v – коэффициент регрессии, кВт · ч · с/(м² · сут.); β_d – коэффициент регрессии, кВт · ч/(м · сут.); β_0 – свободный член уравнения регрессии, кВт · ч/сут.; P – грузооборот нефти, тыс. т · км/сут.; v – вязкость нефти, м²/с; d_3 – эквивалентный диаметр нефтепровода, м.

Таблица 1

Результаты испытаний противотурбулентной присадки FLO XL на участке Бобовичи – Зашебье

Концентрация присадки, г/т	Коэффициент эффективности, %	
	Участок	
	«Дружба-1»	«Дружба-2»
6,1	16,1	–
4,8	–	14,7
6,4	–	17,8

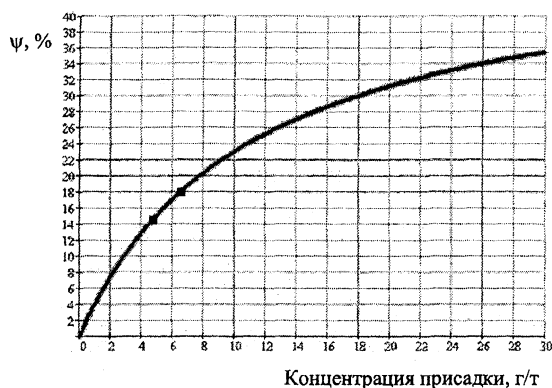


Рис. 1. Динамика коэффициента эффективности присадки на участке Бобовичи – Зашебье («Дружба-2»)

Область применения выражения (2) ограничивается максимальным и минимальным значениями каждого фактора, включенного в данное уравнение регрессии на рассматриваемом интервале грузооборота:

$$\begin{cases} P \in [P_{\min}; P_{\max}]; \\ v \in [v_{\min}; v_{\max}]; \\ d_э \in [d_{э\min}; d_{э\max}], \end{cases} \quad (3)$$

где P_{\min}, P_{\max} – соответственно минимальное и максимальное значения грузооборота нефти в выборке статистической информации, тыс. т · км/сут.; v_{\min}, v_{\max} – соответственно минимальное и максимальное значения вязкости нефти в выборке статистической информации, m^2/c ; $d_{э\min}, d_{э\max}$ – соответственно минимальное и максимальное значения ЭД нефтепровода в выборке статистической информации, м.

Эквивалентный диаметр нефтепровода – условный диаметр сложного (по количеству ниток, наличию лупингов и последовательно соединенных участков нефтепровода различного диаметра) нефтепровода, представленного в виде однопипочного нефтепровода неизменного диаметра, обеспечивающий равенство гидравлических потерь при заданном расходе нефти по длине однопипочного и сложного нефтепроводов.

Анализ существующих гидравлических режимов транспортировки нефти для предприятий трубопроводного транспорта нефти Республики Беларусь показал, что в подавляющем большинстве случаев режим течения нефти является турбулентным в зоне Блазиуса. Выражения для расчета ЭД нефтепровода имеют вид [8]:

- для лупинга (рис. 2а)

$$d_э = \left(\sum_i d_i^{4,75/1,75} \right)^{1,75/4,75}, \text{ м}, \quad (4)$$

где d_i – эквивалентный диаметр i -го параллельного участка нефтепровода, м;

- для вставки (рис. 2б)

$$d_3 = \sqrt[4,75]{\sum_i l_i / \sum_i \frac{l_i}{d_i^{4,75}}}, \text{ м}, \quad (5)$$

где d_i – эквивалентный диаметр i -го последовательного участка нефтепровода, м; l_i – протяженность i -го последовательного участка нефтепровода, км.

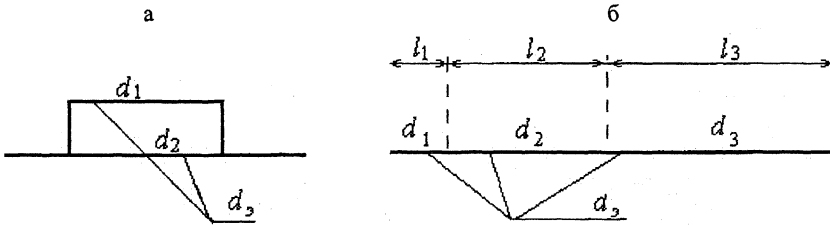


Рис. 2. Расчетная схема определения d_3 : а – для лупинга; б – для вставки

Эквивалентный диаметр участка нефтепровода при добавлении противотурбулентных присадок может быть рассчитан с использованием унифицированного выражения Л. С. Лейбензона для расчета потерь напора по длине нефтепровода [8]

$$d_i = \left(0,0247 \frac{q^{1,75} \nu^{0,25}}{H - \Delta z} l \right)^{1/4,75}, \text{ м}, \quad (6)$$

где q – расход нефти, м³/с; ν – кинематическая вязкость нефти, м²/с; l – протяженность участка нефтепровода, м; H – полные потери напора на участке нефтепровода, м; Δz – разница высотных отметок конца и начала участка нефтепровода.

В случае расчета фактического значения ЭД участка нефтепровода при добавлении противотурбулентных присадок параметр H определяется по диспетчерским данным как разница между показаниями манометров, установленных в начале и конце участка нефтепровода. В случае расчета прогнозного значения ЭД участка нефтепровода параметр H рассчитывается по выражению

$$H = \Delta h(1 - \psi) + \Delta z, \text{ м}, \quad (7)$$

где Δh – потери напора по длине участка нефтепровода, м; ψ – эффективность присадки, о. е.; Δz – разница высотных отметок конца и начала участка нефтепровода, м.

Суточную экономию ЭЭ от применения противотурбулентных присадок предлагается оценивать по следующему выражению:

$$\Delta W = e_d \left(1 - \frac{d_{32}}{d_{363}} \right) W_{63}, \text{ кВт} \cdot \text{ч/сут.}, \quad (8)$$

где e_d – коэффициент эластичности расхода ЭЭ по ЭД нефтепровода, который представляет собой отношение темпов роста зависимой переменной W к темпам роста независимой переменной d_3 и позволяет судить, на

сколько процентов изменится зависимая переменная при варьировании независимой переменной на 1 %, о. е.; $d_{эбаз}$ – базисное значение ЭД нефтепровода (до проведения мероприятия), м; $d_{э2}$ – измененное значение ЭД нефтепровода в результате проведенного мероприятия, м; $W_{баз}$ – базисное электропотребление, соответствующее электропотреблению до проведения энергосберегающего мероприятия, кВт · ч/сут.

Экономия ЭЭ от применения противотурбулентных присадок, выраженная в процентах от суточного расхода ЭЭ до проведения энергосберегающего мероприятия, определяется по выражению

$$\Pi_d = \frac{\Delta W}{W_{баз}} \cdot 100 = e_d \left(1 - \frac{d_{э2}}{d_{эбаз}} \right) \cdot 100, \% \quad (9)$$

С использованием модели вида (2) построена номограмма (рис. 3), позволяющая оценивать экономию ЭЭ от проведения энергосберегающих мероприятий, влияющих на $d_э$. Использование этой номограммы позволяет оценить экономию ЭЭ, в частности, за счет применения противотурбулентной присадки.

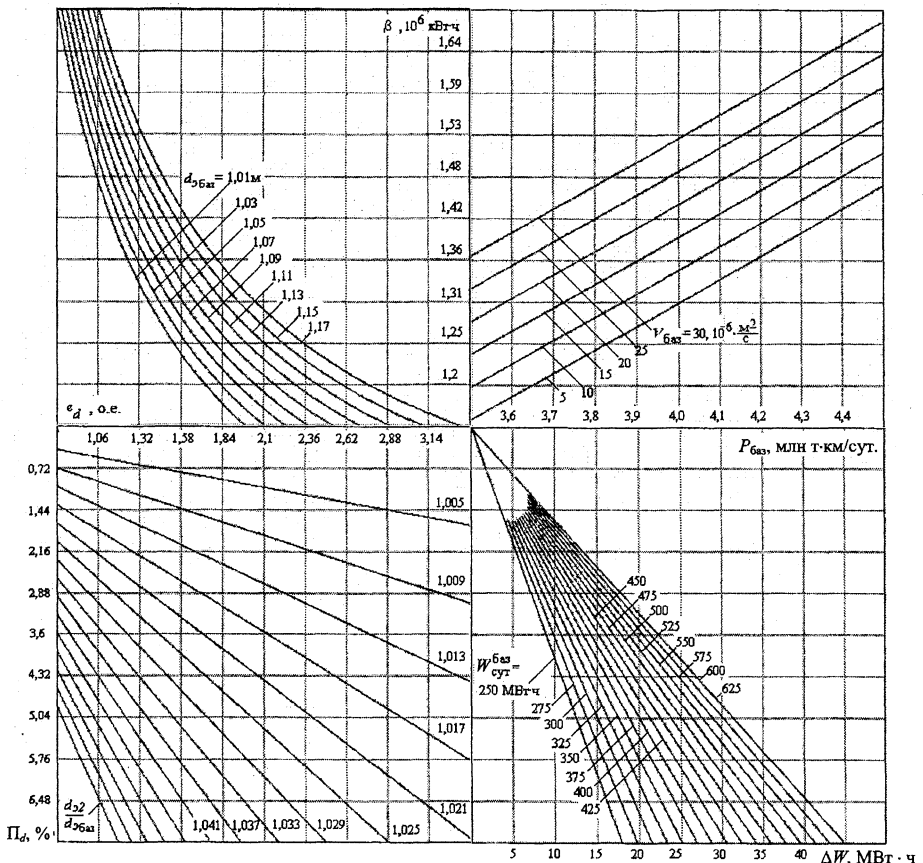


Рис. 3. Номограмма определения суточной экономии ЭЭ при изменении $d_э$ от 0,5 до 6,1 %.

Ключ к номограмме: $P_{баз} \rightarrow v_{баз} \rightarrow \beta \rightarrow d_{эбаз} \rightarrow e_d \rightarrow \frac{d_{э2}}{d_{эбаз}} \rightarrow \Pi_d \rightarrow W_{баз} \rightarrow W_{эк}$

Произведем оценку экономии ЭЭ от применения противотурбулентной присадки для условий описанного выше эксперимента. Исходными данными для расчета явились базисные значения: $P_{\text{баз}} = 42164$ тыс. т · км/сут., $v_{\text{баз}} = 13,4 \cdot 10^{-6}$ м²/с; $d_{\text{эбаз}} = 1,163$ м; $W_{\text{баз}} = 582724$ кВт · ч/сут. – до применения противотурбулентных присадок, а также $d_{\text{э2}} = 1,175$ м – после заполнения присадкой всего участка нефтепровода.

С использованием номограммы по значениям $P_{\text{баз}}$ и $v_{\text{баз}}$ определяется параметр $\beta = 1,45$ млн кВт · ч. По полученному значению β и $d_{\text{эбаз}}$ находится коэффициент эластичности $e_d = 1,50$ о. е. С использованием значений e_d и $\frac{d_{\text{э2}}}{d_{\text{эбаз}}} = 1,011$ определяется суточная экономия ЭЭ в относительном ($\Pi_d = 1,62$ %) и абсолютном ($\Delta W = 9453$ кВт · ч/сут.) выражениях.

Несмотря на высокую энергетическую эффективность, применение противотурбулентных присадок ограничено из-за их высокой стоимости. В табл. 2 приведены экономия ЭЭ от добавления противотурбулентной присадки FLO XL и затраты на ее приобретение при цене 7,5 дол. США за 1 кг. Видно, что затраты на добавление присадки значительно выше стоимости сэкономленной ЭЭ, причем с ростом концентрации присадки убыток от ее применения увеличивается. Данный факт объясняется видом зависимости эффективности присадки от ее концентрации. С повышением концентрации присадки прирост ее эффективности снижается (рис. 1). В табл. 2 проведено сопоставление сэкономленной ЭЭ от применения противотурбулентной присадки и затрат на ее приобретение.

Таблица 2

Сопоставление сэкономленной ЭЭ от добавления противотурбулентной присадки FLO XL с затратами на приобретение

Тариф		Экономия ЭЭ				Суточный расход присадки	Цена присадки FLO XL	Стоимость присадки	Убыток		
		Всего	в том числе								
За эл. энергию	За максимум нагрузки		от снижения расхода ЭЭ	от снижения максимума нагрузки	млн руб/сут.	млн руб/сут.	млн руб/сут.	т/сут.	млн руб/т	млн руб/сут.	млн руб/сут.
руб/(кВт · ч)	руб/кВт	кВт · ч/сут.	млн руб/сут.	млн руб/сут.	млн руб/сут.	т/сут.	млн руб/т	млн руб/сут.	млн руб/сут.	млн руб/сут.	млн руб/сут.
119,3	12837,8	9453	1,30	1,13	0,17	0,655	16,43	10,76	9,47		
		3779	0,52	0,45	0,07	0,655		10,76	10,24		
		4437	0,61	0,53	0,08	0,874		14,35	13,74		

ВЫВОДЫ

1. Эффективность использования противотурбулентных присадок при транспортировке нефти может быть оценена процентным снижением потерь напора по длине нефтепровода при постоянной производительности, что соответствует увеличению эквивалентного диаметра нефтепровода.

2. Предложена номограмма для оценки возможной экономии электрической энергии за счет добавления противотурбулентных присадок.

3. В связи с высокой стоимостью присадок их постоянное использование в качестве энергосберегающего мероприятия станет экономически оправданным при снижении стоимости присадки до 1,0 дол. США за 1 кг (при использовании ее в объеме 4–6 г/т).

4. Использование противотурбулентных присадок в качестве постоянно проводимого энергосберегающего мероприятия экономически нецелесообразно до тех пор, пока стоимость присадки не снизится до 1,0 дол. США за 1 кг (при использовании ее в объеме 4–6 г/т). В случае, когда противотурбулентная присадка применяется для увеличения пропускной способности нефтепровода, эффект от ее применения может быть усилен полученной экономией электрической энергии.

ЛИТЕРАТУРА

1. T o m s, B. A. Some observations on the flow oil linear polymer solutions thought straight tubes at large Reynolds numbers / B. A. Toms // Proc. Intern. Congr. on Rheology. – Amsterdam, 1949. – V. 11. – P. 135.

2. H o y t, J. W. The Effect of Additives on Fluid Friction / J. W. Hoyt, A. G. Fabula // Proceedings of the 5th ONR Symposium on Naval Hydrodynamics, 1964. – P. 947–974.

3. T u l i n, M. P. Hydrodynamics Aspects of Macromolecular Solutions / M. P. Tulin // Proceedings of the 6th ONR Symposium on Naval Hydrodynamics. – Washington, D.C., 1966. – P. 3–18.

4. Е р о ш к и н а, И. И. Влияние малых полимерных добавок на частоту пристенных турбулентных выбросов при течении жидкости в трубопроводе / И. И. Ерошкина и [др.] // Транспорт и хранение нефтепродуктов. – 2000. – № 4. – С. 15–18.

5. С м о л л, С. Р. Добавки, снижающие сопротивление течения в трубопроводах / С. Р. Смолл // Нефть, газ и нефтехимия за рубежом. – 1983. – № 6. – С. 58–60.

6. Д о л г и й, А. А. Применение дисперсионных присадок при трубопроводном транспорте нефтепродуктов / А. А. Долгий и [др.] // Надежность и безопасность магистрального трубопроводного транспорта: Тез. докл. IV междунар. науч.-техн. конф. – Новополюк: УО «ПГУ», 2003. – С. 30–31.

7. А н и щ е н к о, В. А. Способ построения модели режимов электропотребления участка нефтепровода / В. А. Анищенко, Н. В. Токочакова, А. С. Фиков // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2005. – № 6. – С. 44–47.

8. Б л е й х е р, Э. М. Технологический расчет нефтепроводов / Э. М. Блейхер и [др.]. – М.: Московский институт нефтехимической и газовой промышленности им. И. М. Губкина, 1981. – 368 с.

Представлена кафедрой
электроснабжения ГГТУ

Поступила 5.05.2006