

# ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЕ ВАРИАНТЫ ПОДОГРЕВА ТЯЖЕЛЫХ ЖИДКИХ ТОПЛИВ С ПЕРЕМЕННЫМИ ВЯЗКОПЛАСТИЧНЫМИ СВОЙСТВАМИ

*Решетникова В.И., Попов Д.Н., Варфоломеева О.И., Хворенков Д.А.  
Ижевский государственный технический университет, tguug@istu.ru*

В настоящее время все большее распространение получает метод высокочастотного индукционного подогрева тяжелых жидких топлив (рис. 1). Вместе с тем, эффективность данного способа можно повысить, используя нагревательные элементы, расположенные непосредственно в трубопроводе (рис. 2). Такие элементы, хотя и создают дополнительные сопротивления потоку, но в то же время способствуют более интенсивному теплообмену. Положение усугубляется еще и тем, что некоторые виды нефтепродуктов (например, мазут М100) в определенном диапазоне температур приобретают неньютоновские свойства. Указанные обстоятельства определяют необходимость настоящего расчетного исследования.

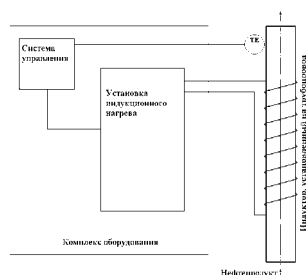


Рис. 1. Традиционная схема подогрева

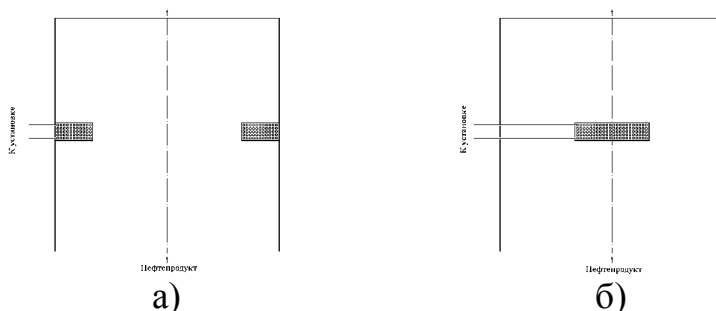


Рис. 2. Предлагаемые схемы подогрева:  
а) нагревательные элементы в виде выступов;  
б) нагревательные элементы в виде центрального тела

Для расчета процессов гидродинамики и теплообмена, происходящих в классических системах хранения и подачи жидкого топлива, авторами применялась математическая модель [1], разработанная на основе двумерных нестационарных уравнений Навье-Стокса, записанных в естественных (скорость-давление) переменных. В настоящей статье рассматривается несколько иной подход, основанный на использовании уравнений динамики несжимаемой ( $\rho = const$ ) неньютоновской жидкости в преобразованных ( $\omega$  - завихренность,  $\psi$  - функция тока) переменных и степенного реологического закона:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \omega}{\partial t} + \xi_x \frac{\partial(u\omega)}{\partial \xi} + \eta_y \frac{\partial(v\omega)}{\partial \eta} &= \frac{\xi_x^2}{\rho} \frac{\partial^2(\mu_{eff}\omega)}{\partial \xi^2} + \frac{\xi_{xx}}{\rho} \frac{\partial(\mu_{eff}\omega)}{\partial \xi} + \frac{\eta_y^2}{\rho} \frac{\partial^2(y\mu_{eff}\omega)}{\partial \eta^2} + \\ &+ \frac{1}{\rho} \left( \eta_{yy} - \frac{\eta_y}{y} \right) \frac{\partial(y\mu_{eff}\omega)}{\partial \eta} - \beta g \eta_y \frac{\partial T}{\partial \eta}, \\ \xi_x^2 \frac{\partial^2 \psi}{\partial \xi^2} + \xi_{xx} \frac{\partial \psi}{\partial \xi} + \eta_y^2 \frac{\partial^2 \psi}{\partial \eta^2} + \left( \eta_{yy} - \frac{\eta_y}{y} \right) \frac{\partial \psi}{\partial \eta} &= -\omega \cdot y, \\ \frac{\partial T}{\partial t} + \xi_x \frac{\partial(uT)}{\partial \xi} + \frac{\eta_y}{y} \frac{\partial(yvT)}{\partial \eta} &= a \left[ \xi_x^2 \frac{\partial^2 T}{\partial \xi^2} + \xi_{yy} \frac{\partial T}{\partial \xi} + \eta_y^2 \frac{\partial^2 T}{\partial \eta^2} + \left( \eta_{yy} + \frac{\eta_y}{y} \right) \frac{\partial T}{\partial \eta} \right] + \frac{\mu_{eff}}{c\rho} \Phi, \end{aligned} \quad (1)$$

$$u = \frac{\eta_y}{y} \frac{\partial \psi}{\partial \eta}, \quad v = -\frac{\xi_x}{y} \frac{\partial \psi}{\partial \xi},$$

где  $u$  и  $v$  - проекции вектора скорости по осям  $x$  и  $y$  соответственно;  $T$  - температура;  $a = \frac{\lambda}{c\rho}$ ,  $\lambda$  и  $\beta$  - коэффициенты теплопроводности, теплоемкости и температурного расширения жидкости;  $c$  - теплоемкость  $\mu_{eff} = k\Phi^{0,5(n-1)}$  - эффективная вязкость;  $k = \rho \left\{ \exp_{10} [\exp_{10} (9,855 - 3,7451 \lg T) - 0,8] \cdot 10^{-6} \right\}$  и  $n = n_{T \geq 323K} - \frac{n_{T \geq 323K} - n_{T=298K}}{323 - 298} (323 - T)$  - мера консистенции и показатель неньютоновского поведения жидкости;  $\Phi = 2 \left[ \left( \xi_x \frac{\partial u}{\partial \xi} \right)^2 + \left( \eta_y \frac{\partial v}{\partial \eta} \right)^2 + \left( \frac{v}{y} \right)^2 \right] + \left( \eta_y \frac{\partial u}{\partial \eta} + \xi_x \frac{\partial v}{\partial \xi} \right)^2$  - интенсивность сдвиговых деформаций;  $n_{T \geq 323K}$  и  $n_{T=298K}$  - показатели степени, которые для мазута марки М100 со средним парафиносодержанием составляют соответственно 1 и 0,783.

За счет введения новых независимых переменных  $\xi$  и  $\eta$  система (1) с коэффициентами  $\xi_x$ ,  $\eta_y$ ,  $\xi_{xx}$ ,  $\eta_{yy}$  (где  $\xi_x = \frac{\partial \xi}{\partial x}$  и т. д.) адаптирована для расчетных областей, покрытых прямолинейной ортогональной неравномерной сеткой со сгущением узлов в продольном и поперечном направлениях в местах, где ожидаются большие градиенты искомых величин. Кроме того, система уравнений дополняется начальными и граничными условиями.

Расчетная модель тестировалась на основе аналитических решений течения неньютоновской теплопроводной жидкости в прямолинейном трубопроводе. Во всех вариантах сравнения относительная погрешность результатов не превышала 0,15 %.

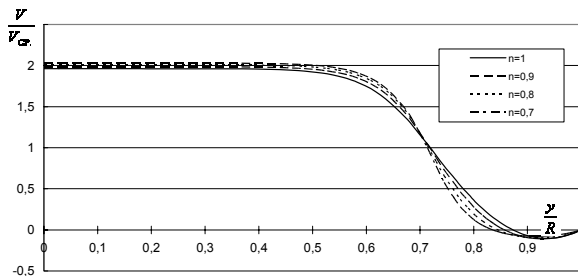


Рис. 3. Изменение продольной скорости по радиусу трубы за препятствием в виде выступа

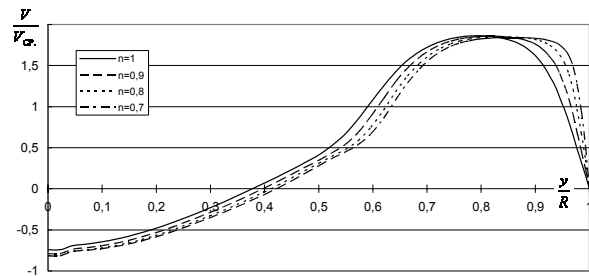


Рис. 4. Изменение продольной скорости по радиусу трубы за препятствием в виде центрального тела

Как следует из рис. 3, при снижении показателя  $n$  наблюдается увеличение осевой составляющей скорости примерно до уровня среза препятствия. В силу баланса массового расхода это приводит к увеличению циркуляционной области в продольном направлении. При движении жидкости за цилиндрическим центральным телом уменьшение  $n$  приводит к более существенным градиентам скорости вблизи стенки, в то время как аналогичные изменения вблизи оси симметрии в области возвратно-циркуляционного течения становятся менее заметными, начиная с  $n = 0,8$ .

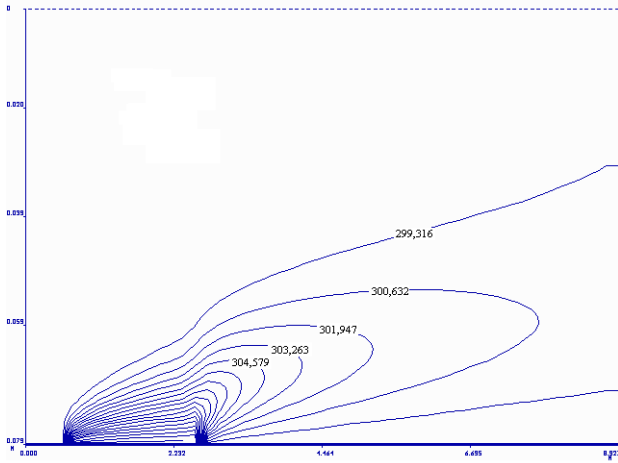


Рис. 5. Распределение температуры в области с подогреваемой вставкой

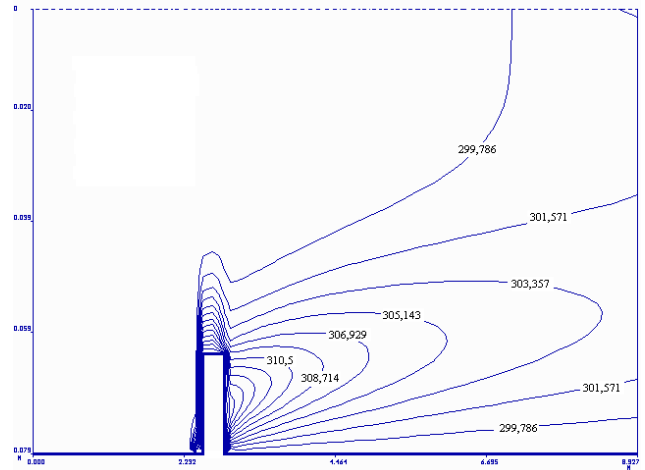


Рис. 6. Распределение температуры в области с подогреваемым выступом

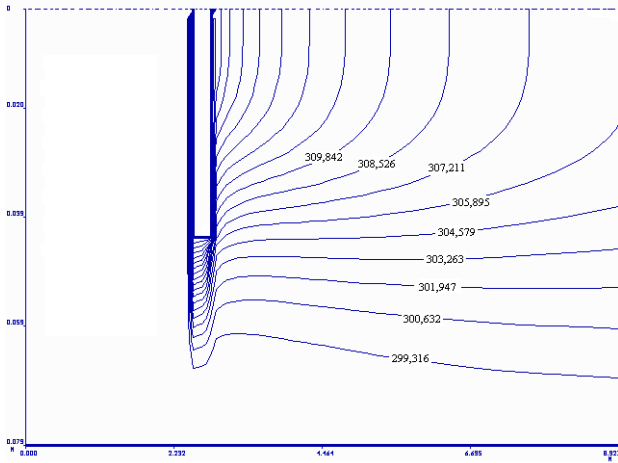


Рис. 7. Температурное поле в области с подогреваемым центральным телом

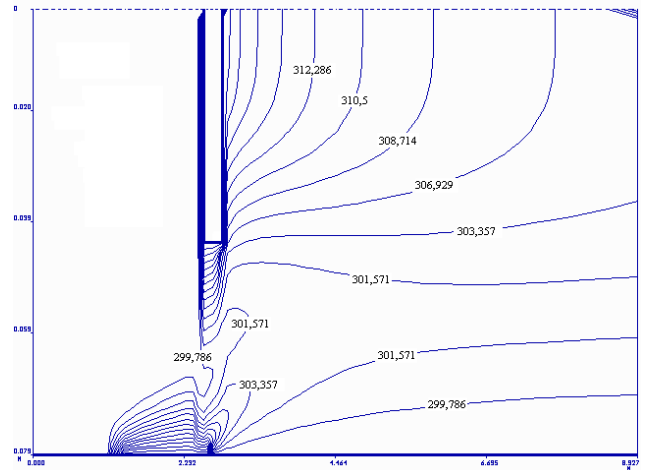


Рис. 8. Температурное поле при комбинированном подогреве

На рис. 5-8 показаны распределения температуры для различных случаев подогрева мазута с переменными  $k$  и  $n$ . Из рисунков следует, что для вариантов с местными сопротивлениями в виде выступа или центрального тела распространение тепла происходит более интенсивно. Особенно рациональным для подогрева мазута представляется комбинирование рассмотренных способов. Так, использование подогреваемой вставки совместно с центральным телом позволяет исключить непрогретые зоны.

#### Библиографический список

1. Варфоломеева О.И., Попов Д.Н. Численное моделирование неізотермических течений жидкого топлива с переменной вязкостью в теплоэнергетическом оборудовании // Промышленная энергетика. 2011. № 12. С. 11-13.