

Ю.Я. Печенегов¹, А.Л. Мыдлык², А.В. Бутузов², Е.С. Балакин²,
Е.С. Садилин², И.Н. Попов², В.А. Крестелев², М.В. Дубровин¹

Саратовский государственный технический университет, Россия (1)
ОАО Сызранский завод «Нефтемаш», Россия (2)

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ ПОДОГРЕВАТЕЛЯ НЕФТИ ПНК – 1,9 С ИНТЕНСИФИЦИРОВАННЫМ ТЕПЛООБМЕНОМ ПРОДУКТОВ ГОРЕНИЯ ТОПЛИВА

АННОТАЦИЯ

Приведены результаты испытаний промышленного образца подогревателя обводненной нефти типа ПНК-1,9 (подогреватель нефти с комбинированным нагревом тепловой мощностью 1,9 МВт). Теплопередающие поверхности подогревателя со стороны продуктов горения топлива снабжены элементами дискретной шероховатости. Показано, что наличие этих элементов, интенсифицируя теплообмен греющего теплоносителя, позволяет значительно улучшить массогабаритные показатели подогревателя.

1. ВВЕДЕНИЕ

Для нагрева водонефтяных эмульсий в технологии подготовки нефти на промыслах широко используются огневые подогреватели с промежуточным теплоносителем (водой) [1]. Подогреватели включают в себя продуктовые трубы, соединенные в змеевик, и одну или несколько жаровых труб. Трубы размещены в общем корпусе, заполненном водой. В таких подогревателях обеспечиваются «мягкие» температурные условия нагрева нефти, исключается коксование продукта внутри труб. Однако низкая интенсивность теплообмена продуктов горения топлива и малое значение разности температур промежуточного теплоносителя и продукта приводят к очень громоздким и металлоемким конструкциям.

На Сызранском заводе «Нефтемаш» разработан новый подогреватель [2] с комбинированным нагревом ПНК-1,9, который в значительной степени лишен названных недостатков. Ниже представлены основные характеристики разработанного подогревателя, полученные в результате его испытаний.

2. ОПИСАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ПОДОГРЕВАТЕЛЯ

Схема подогревателя представлена на рис. 1.

В корпусе 1 подогревателя размещены высокотемпературная 2 и низкотемпературная 3 зоны жаровой трубы, соединенные между собой поворотной камерой 4, а с противоположной стороны примыкающие соответственно к горелочному устройству 5 и к дымовой трубе 6. Над жаровой трубой расположена часть 7 продуктового змеевика, а другая часть 8 размещена в низкотемпературной зоне 3 жаровой трубы. На внутренней стороне стенки высокотемпературной зоны 2 жаровой трубы установлены кольцатурбулизаторы 9, а поверхность продуктовой трубки части 8 змеевика снабжена выступами-турбулизаторами 10, выполненными в виде спирали. В рабочем состоянии корпус 1 полностью заполнен водой.

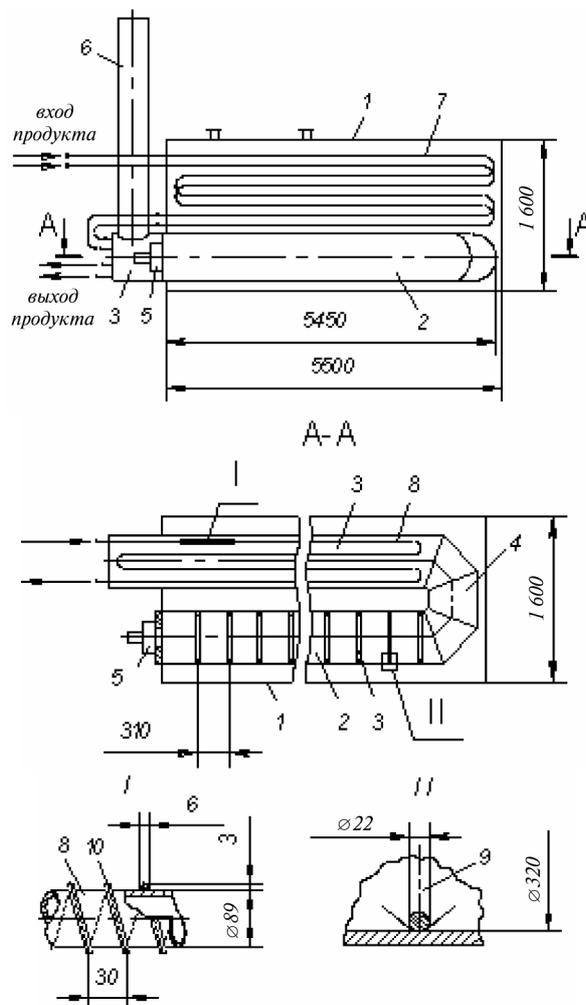


Рис. 1. Схема подогревателя ПНК-1,9

На внутренней стороне стенки высокотемпературной зоны 2 жаровой трубы установлены кольцатурбулизаторы 9, а поверхность продуктовой трубки части 8 змеевика снабжена выступами-турбулизаторами 10, выполненными в виде спирали. В рабочем состоянии корпус 1 полностью заполнен водой.

Подогреватель является двухпоточным по продукту. Продуктовые трубы наружным диаметром 89 мм и жаровая труба внутренним диаметром 620 мм выполнены из углеродистой стали. Обе части продуктового змеевика сформированы из прямых труб и крутоизогнутых отводов с шагом 160 мм. Суммарная длина продуктовых труб в части 7 змее-

вика составляет 259 м, а в части δ она равна 90 м. Эквивалентный диаметр, определенный как учетверенное отношение площади свободного сечения к смоченному периметру, при продольном обтекании газами пучка труб змеевика δ составляет 0,0827 м. Выступы-турбулизаторы 10 на поверхности продуктовой трубы части δ змеевика выполнены наплавкой на сварочной машине. Кольца-турбулизаторы 9 в высокотемпературной зоне 2 жаровой трубы выполнены из прутков круглого сечения и с обеих сторон приварены ручной сваркой к стенке трубы швом высотой 6 мм. Всего размещено 13 колец-турбулизаторов с постоянным шагом 310 мм.

Приведенные на рис. 1 размеры элементов дискретной шероховатости приняты как оптимальные по рекомендациям [3].

Подогреватель оснащен двухпроводной горелкой типа ГСАУ-300, разработанной Самарским гос-техуниверситетом, имеющей номинальную тепловую мощность 3 МВт и отличающуюся высокой компактностью. Для подачи воздуха в горелку используется вентилятор ВР-12-26-3,15. Фронтальная торцевая стенка топки с внутренней стороны имеет футеровку из огнеупорного материала толщиной 140 мм. Подогреватель рассчитан на работу топки при избыточном давлении до 500 Па.

3. ИЗМЕРЕНИЯ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ

Испытания подогревателя были проведены на заводе-изготовителе (ОАО «Нефтемаш»). В качестве нагреваемого продукта использовали воду из заводской системы водоснабжения. Топливом служил природный газ с теплотой сгорания $Q_H^p = 33300$ кДж/м³.

Измерение расходов воды и топлива осуществлялось с помощью промышленных счетчиков скоростного типа. Температура потока воды на входе и выходе змеевика измерялась ртутными термометрами с ценой деления 1 °С, а давление контролировалось техническими пружинными манометрами.

Температура промежуточного теплоносителя – воды измерялась в девяти точках, рассредоточенных по поперечному сечению в середине подогревателя, при помощи термопар ХА, изолированные электроды которых диаметром 1 мм выводились к вторичному прибору – милливольтметру через специальный штуцер в корпусе подогревателя. С помощью термопар ХА, спаи которых плотно прижимались нажимными болтами к наружной поверхности жаровой трубы, измерялась температура стенки в четырех диаметрально расположенных точках в сечении, отстоящем от горелочного торца на 1 м.

По тракту продуктов горения топлива проводились измерения давления в топке и на входе в дымовую трубу с помощью U-образных манометров с ценой деления 10 Па. Температура газов при входе в пучок продуктовой трубы δ измерялась двумя термопарами ХА в центре сечения жаровой трубы перед пучком, причём спай одной термопары был открыт, а спай другой находился в цилиндрическом

продуваемом экране. Экран позволял снизить погрешность измерения, обусловленную лучистым переносом тепла от спая к холодным стенкам окружающих поверхностей теплопередачи. Температура газов при входе в дымовую трубу, а также состав продуктов сгорания (в том числе и продуктов недожога, окислов азота и серы), значения коэффициента избытка воздуха и КПД подогревателя определялись с помощью многофункционального газоанализатора DAG-500, имеющего в своем составе цифровой дисплей и печатающее устройство.

Измерения проводились при установившихся динамическом и тепловом режимах.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

В процессе испытаний расход топливного газа варьировался в интервале $B = 63 \div 220,3$ м³/ч, расход воды через продуктовой змеевик – $V = 8 \div 18$ м³/ч. Коэффициент избытка воздуха при горении топлива для основного числа опытов находился в интервале $\alpha = 1,03 \div 1,07$; для нескольких опытов он был выше и достигал значения 1,45. Полезная тепловая мощность Q подогревателя изменялась от 0,5 до 1,85 МВт. Дальнейшее увеличение Q ограничивалось предельным ресурсом системы водоснабжения, из которой подавалась вода в продуктовой змеевик. Нагрев воды в змеевике осуществлялся от 10 °С до температуры не выше 93 °С.

По результатам измерений в каждом опыте составлялся тепловой баланс подогревателя. Расхождение приходной и расходной частей баланса не превышало 10 %, а для большинства опытов оно было меньше 6 %.

Результаты испытаний представлены в виде графиков на рис. 2, 4–7.

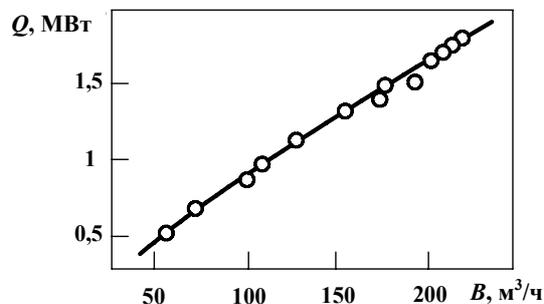


Рис. 2. Зависимость полезной мощности Q подогревателя от расхода топлива B

Как видно из рис. 2, передаваемая воде в продуктовой змеевике тепловая мощность Q почти линейно увеличивается с ростом расхода топлива. Расчетные кривые на рис. 3 показывают, что передача тепла от продуктов сгорания топлива осуществляется в основном конвекцией.

Представленные на рис. 4 результаты измерения температур продуктов сгорания показывают, что при номинальной тепловой нагрузке подогревателя температура газов перед пучком продуктовой

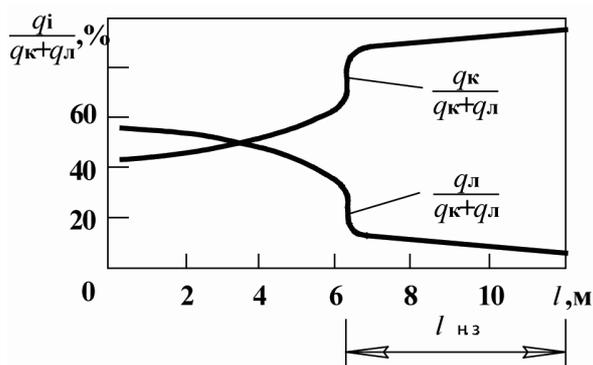


Рис. 3. Изменение долей конвективной и лучистой передачи тепла от продуктов сгорания топлива по длине l жаровой трубы: q_k – плотность теплового потока передаваемого конвекцией на участке трубы; q_l – то же лучеиспусканием; $l_{н.з}$ – низкотемпературная зона с продуктовыми трубами

труб (рис. 4, б) не достигает значения $1000\text{ }^\circ\text{C}$, которое определено как предельная из условия недопущения активного отложения кокса на стенках труб при нагреве водонефтяной эмульсии. Видно также, что при малых тепловых нагрузках различия в показаниях термопар с экранированным и открытым спаями может достигать $100\text{ }^\circ\text{C}$.

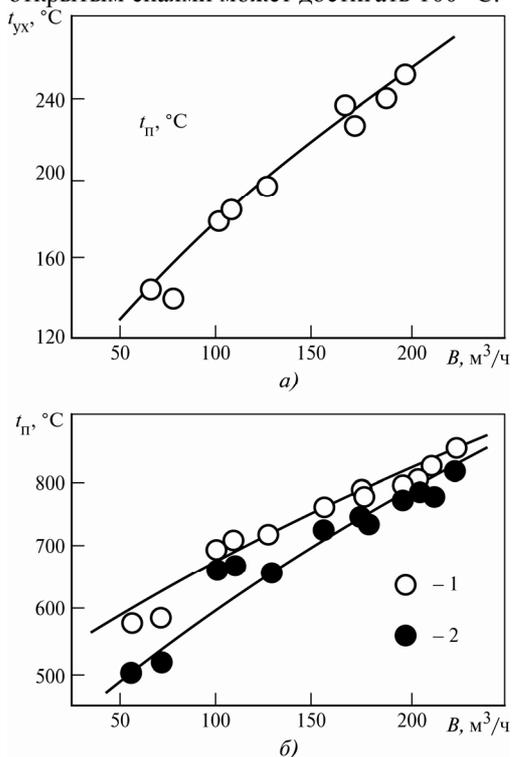


Рис. 4. Зависимость температуры $t_{у\kappa}$ уходящих из подогревателя газов (а) и температуры $t_{п}$ газов при входе в пучок продуктовых труб (б) от расхода топлива B : 1 – показания термопары с экранированным спаем; 2 – показания термопары с открытым спаем

Наличие элементов дискретной шероховатости на поверхностях теплообмена приводит к росту гидравлического сопротивления движению газов. Но, как следует из рис. 5, потеря давления газа в жаровой трубе не является большой и вполне ком-

пенсруется за счет избыточного давления в топке. При этом нет необходимости в дополнительном источнике тяги, а высота дымовой трубы может быть ограничена значением 3 м, достаточным для рассеивания продуктов горения топлива.

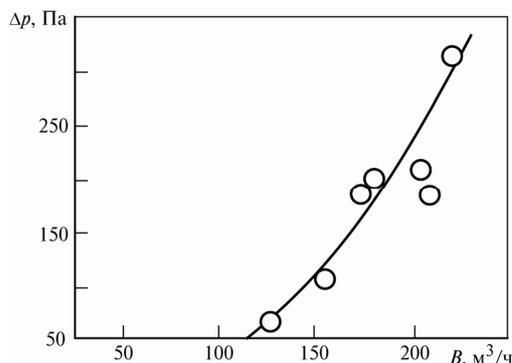


Рис. 5. Зависимость перепада давления Δp продуктов горения топлива на длине жаровой трубы от расхода топлива B

Различия в показаниях термопар, измеряющих температуру промежуточного теплоносителя – воды в поперечном сечении подогревателя, в различных опытах составляли от 5 до $8\text{ }^\circ\text{C}$. Это указывало на наличие развитого циркуляционного движения воды в корпусе. Изменение осредненной в сечении температуры $t_{в}$ промежуточного теплоносителя в зависимости от расхода топлива B приведено на рис. 6.

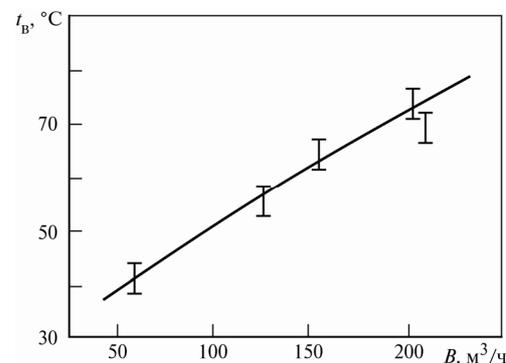


Рис. 6. Зависимость средней температуры $t_{в}$ промежуточного теплоносителя в корпусе от расхода топлива B

Измерения температуры стенки в четырех диаметрально расположенных точках сечения жаровой трубы показали, что различие температур по окружности трубы не более $1\div 3\text{ }^\circ\text{C}$. Средняя температура стенки жаровой трубы была выше средней температуры промежуточного теплоносителя на $30\div 40\text{ }^\circ\text{C}$. Меньшее значение из данного интервала соответствует большим тепловым нагрузкам.

Определенные с помощью газоанализатора DAG-500 значения КПД подогревателя представлены на рис. 7 в виде зависимости от расхода топлива. Интервал изменения КПД составляет $88\div 94,5\%$.

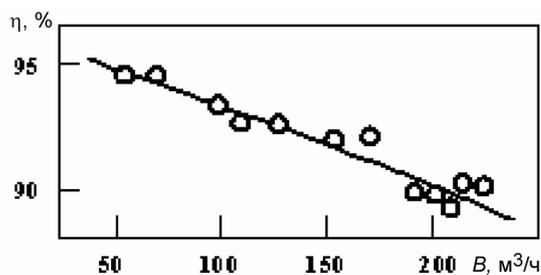


Рис. 7. Зависимость коэффициента полезного действия η подогревателя от расхода топлива V

На всех исследованных режимах подогреватель показал устойчивую работу. Недожог топлива полностью отсутствовал. Не обнаружены в продуктах сгорания и окислы азота.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование элементов дискретной шероховатости на поверхностях теплообмена, контактирующих с продуктами сгорания топлива, позволило за счет интенсификации теплопередачи значительно уменьшить массу и объем подогревателя. По сравнению с известными, выпускаемыми промышленно-

стью аналогам (подогреватели типов ПНПТ-1,6; ПП-1,6; ПП-1,6 МГ, ПБТ-1,6 М) разработанный подогреватель имеет в среднем в три раза меньшее значение отношения номинальной тепловой мощности подогревателя к его весу и в шесть раз меньшее значение подобного вида габаритного показателя. За счет высокого КПД достигается значительный энергосберегающий эффект.

Результаты выполненных измерений находятся в хорошем согласии с расчетом по рекомендациям [3].

Можно прогнозировать возможность работы подогревателя с повышенной по отношению к номинальной, тепловой мощностью (до 3 МВт).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Медведев В.Ф.** Сбор и подготовка нефти и воды. М.: Недра, 1986. 220 с.
2. **Заявка** на изобретение № 2005124809. Подогреватель/ Ю.Я. Печенегов. 2005.
3. **Калинин Э.К., Дрейцер Г.А., Ярхо С.А.** Интенсификация теплообмена в каналах. – 3 изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1990. 208 с.