

Heat Tracing Calculations (Steam and Electrical Tracing)

Introduction:

Heat tracing is used to prevent heat loss from process fluids being transported in process fluid pipes, when there is risk of damage to piping, or interference with operation such

as fouling or blockage, caused by the congealing, increase in viscosity, or separation of components, in the fluid below certain temperatures, or when there is risk of formation of corrosive substances or water due to condensation in corrosive services. This prevention of heat loss is accomplished by employing electrical tracing, or steam tracing, and insulating both the process fluid pipe and the tracer together, using appropriate insulation lagging, in an attempt to minimise heat loss from the pipe and tracer to their surroundings.

The existing software that was used to design steam tracing had to be evaluated in terms of its accuracy and reliability, as problems associated with steam tracing designed with the existing software have occurred in the past.

A software simulation had to be designed that could compare theoretical inputs and outputs with that of an existing simulation used to design steam tracing, as well as compare it to existing installed steam tracing, in order to determine where improvements in the software could be made.

The new software had to use the outputs from the existing software as inputs and its outputs had to correspond to the inputs of the existing software. Other important evaluations were also included in the new software.

مقدمه:

Heat Tracing برای جلوگیری از اتلاف حرارت در سیالات پروسه که در لوله ها در حال انتقال میباشند، هنگامیکه ریسک خسارت به لوله ها، تداخل عملکرد از قبیل رسوب یا گرفتگی به علت ماسیدگی، بالا رفتن ویسکوزیته یا جدایی مواد در سیالاتی که دما در آنها از حد مشخصی پایینتر میرود و یا اینکه احتمال شکلگیری مواد خورنده یا آب بعلت چگالش در سرویسهای خورنده وجود دارد استفاده می شود.

جلوگیری از این اتلاف دما به روشهای Electrical Tracing و Steam Tracing انجام می پذیرد. لوله ی سیال پروسه ای و Trace هر دو با هم عایق می شوند برای اینکه کمترین اتلاف حرارتی را به محیط اطراف داشته باشیم.

از آنجایی که یکسری مشکلات در هنگام طراحی Steam Tracing با نرم افزار قبلی پیش آمده بود، این نرم افزار باید از نظر دقت و قابلیت اعتماد مورد ارزیابی قرار می گرفت. یک شبیه سازی نرم افزاری باید طراحی می شد تا ورودی ها و خروجی های تئوری را با شبیه سازی موجود که برای طراحی Steam Tracing استفاده شده مقایسه کند. در عین حال این نرم افزار باید با Steam Tracing نصب شده نیز مقایسه می شد تا تکمیل تر گردد.

Theory:

The term “Heat Tracing” is inclusive for two methods used in the conservation of temperature. The first method is known as electrical heat tracing, and the second is known as steam tracing.

Electrical heat tracing may be described as an insulated electrical heating cable, which is spiralled around the process fluid pipe, after which the pipe and tracing is insulated with the appropriate type and thickness of insulation lagging material. While this method of heat tracing may be installed with

relative ease compared to steam tracing, it is more expensive, and poses several risks. The most important of these, being the risk of electric spark, which may cause electric shock or ignite flammable substances resulting in explosions or fire. If electrical heat tracing is not carefully controlled, there is also the possibility that the cable could overheat and damage the pipe or insulation. This also renders the tracing cable unusable and the cable needs to be replaced.

In order follow the theory of the spreadsheet, the nomenclature sheet in Adobe Acrobat reader format.

Steam tracing is described by attaching a smaller pipe containing saturated steam, also known as the “tracer”, parallel to the process fluid pipe. The two pipes are then also insulated together with the specified insulation and jacketed if necessary. Steam tracing is more labor intensive to install than electrical heat tracing, but there are very few risks associated with it. The temperature of the tracer also cannot exceed the maximum saturation temperature of the steam, as it operates at specific steam pressures.

Steam tracing may be done in one of two ways. Bare steam tracing is the most popular choice as it is fairly easily installed and maintained and it is ideally suited to lower temperature requirements. It is simply composed of a half inch or three quarters of an inch pipe attached to the process fluid pipe by straps and both pipes are then insulated together. The other available option is to make use of cemented steam tracing, during which heat conductive cement is placed around the steam tracer running parallel to the process fluid pipe, (shown in figure 1b), in an attempt to increase the contact area available for heat transfer, between the tracer and the process fluid pipe.

It is necessary to foster a better understanding of the heat loss distribution through an insulated pipe containing steam tracing, before continuing the discussion. For this purpose, detailed diagrams depicting the cross-sections of the two types of tracing methods are given below, in figures 1a and b:

تئوری:

همانطور که گفته شد Heat Tracing برای جلوگیری از اتلاف حرارت بکار می رود و شامل دو روش می شود: Electrical Heat Tracing و Steam Tracing .

Electrical Heat Tracing از یک کابل حرارتی الکتریکی عایق که بصورت مارپیچ دور لوله ی سیال پیچیده شده تشکیل می شود که لوله و Tracing با یک عایق که ضخامت مناسبی دارد عایق می شوند. در عین حال که روش Electrical Heat Tracing به آسانی نسبت به روش Steam Tracing قابل نصب می باشد ولی بسیار گرانتر بوده و ریسک بالایی دارد. مهمترین این ریسکها جرقه ی الکتریکی می باشد که ممکن است باعث برق گرفتگی و یا اشتعال مواد آتشگیر گردد و نهایتاً منجر به انفجار یا آتش سوزی شود. اگر Electrical Heat Tracing با دقت کنترل نشود احتمال بیش از حد گرم شدن کابل و خسارت زدن به لوله یا عایق نیز وجود دارد که در این صورت کابل غیر قابل استفاده می شود و نیاز به تعویض خواهد داشت.

Steam Tracing تشکیل می شود از یک لوله کوچکتر که در بردارنده ی بخار اشباع شده می باشد و همچنین Tracer نیز نامیده می شود و بصورت موازی با لوله ی سیال مورد نظر نصب می شود. سپس هر دو لوله عایق می شوند و یا در صورت نیاز از روش Jacketing استفاده می شود. Steam Tracing نسبت به Electrical Tracing از نظر مسائل ایمنی مربوط به کارگران بیشتر توصیه می گردد. هر چند ریسکهای خاص خود را دارد. در ضمن دمای Tracer نمی تواند بیشتر از max دمای بخار اشباع شود.

Steam Tracing به دو روش انجام می شود:

1- Bare Steam Tracing

2- Cemented Steam Tracing (سیمانی)

Bare Steam Tracing با توجه به نصب، راه اندازی و تعمیرات آسان آن رایجترین گزینه می باشد و برای دماهای پایین مورد نیاز مناسب می باشد. در این روش یک لوله ی " ۱/۲ یا ۲" با تسمه هایی به لوله ی سیال اصلی متصل می شود و هر دو لوله با هم عایق می شوند.

روش دیگر استفاده از Cemented Steam Tracing (سیمانی) می باشد که در آن سیمان از نوع رسانای حرارتی به موازات خط سیال روی آن قرار گرفته و Steam Tracer را در بر می گیرد که در شکل B ۱ نشان داده شده است. این طراحی به صورتی است که بیشترین سطح مقطع انتقال حرارتی را بین Tracer و لوله ی سیال مورد نظر فراهم می کند. در اینجا قبل از اینکه به ادامه ی بحث پردازیم لازم است درک بهتری داشته باشیم از توزیع اتلاف حرارتی از طریق یک لوله ی عایق دار که شامل Steam Tracing می باشد. برای این منظور شکل جزئیات دو لوله با دو روش Tracing که گفته شد بصورت برش مقطعی نشان داده شده است.

Fig. 1a: Bare Tracer

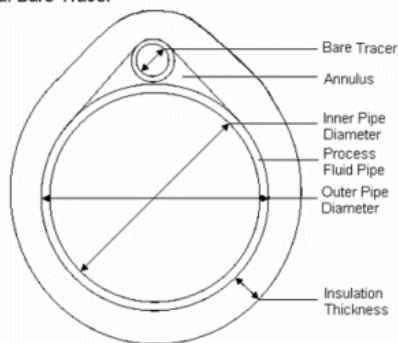
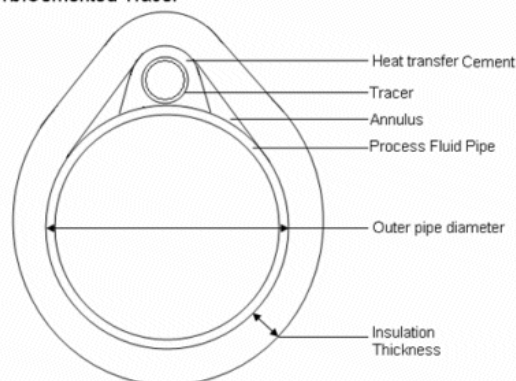


Fig.1b:Cemented Tracer



Because the area around the process fluid pipe and tracer cannot be accurately described simply by assuming perfect cylindrical geometry, provision had to be made for a realistic impression of the true geometry. Detailed derivations of formulas are included in [Appendix 1](#).

Heat transfer across a surface occurs according to the following equation:
(Coulson & Richardson, 1999:634-688)

به علت اینکه ناحیه ی اطراف لوله ی سیال پروسسی و Tracer را نمی توان بصورت یک استوانه کامل در نظر گرفت، محاسبه بر طبق هندسه ی واقعی مساحت اطراف لوله انجام می گیرد که جزئیات آن در [Appendix 1](#) آورده شده است.

انتقال حرارت اطراف یک سطح طبق فرمول زیر محاسبه می شود:

$$Q = UA\Delta T \quad (2.1)$$

معادلات پایین برای مشخص کردن نواحی مختلف که انتقال حرارت در آنها اتفاق می افتد، بدست آمده اند:

$$\alpha = \cos^{-1} \left(\frac{r_1 - r_2}{r_1 + r_2} \right) \quad (2.2)$$

برای Bare Tracing فرمولهای زیر منتج می شوند:

$$L_{ai} = (r_1 - r_2)(\tan \alpha) \quad (2.3)$$

$$Q_{ta} = Q_{al} + Q_{pl} \quad (2.4)$$

$$Q_{ta} = 1.98451554nL(\pi - \alpha)(T_s - T_{ann})^{1.25} r_2^{0.75} \quad (2.5)$$

$$Q_{al} = \frac{2nL(T_{ann} - T_{amb})(r_1 - r_2)(\tan \alpha)}{\left[\frac{t_{ins}}{k_{ins}} + \frac{1}{h_0} \right]} \quad (2.6)$$

$$Q_{pl} = \frac{L(T_p - T_{amb})(2\pi - (1.25 + 0.75n)(\alpha))}{\left[\frac{\ln\left(\frac{r_1}{r_{pinn}}\right)}{k_w} + \frac{\ln\left(\frac{r_{ins}}{r_1}\right)}{k_{ins}} + \frac{1}{h_0 r_{ins}} \right]} \quad (2.7)$$

$$T_{ann} = \frac{(T_s + T_p + T_{ins})}{3} \quad (2.8)$$

$$T_{ins} = 0.5T_{surf} + 0.45T_p + 0.05T_s \quad (2.9)$$

$$k_1 = Q_{ta} - Q_{al} \quad (2.10)$$

$$k_2 = \frac{(2\pi - (1.25 + 0.75n)\alpha)}{\left[\frac{\ln\left(\frac{r_1}{r_{pinn}}\right)}{k_w} + \frac{\ln\left(\frac{r_{ins}}{r_1}\right)}{k_{ins}} + \frac{1}{h_0 r_{ins}} \right]} \quad (2.11)$$

$$T_p = T_{amb} + \frac{k_1}{k_2} \quad (2.12)$$

معادله ی بعد برای مشخص کردن گرمترین سطح Bare Tracing استفاده شده است از منبع:

(Le Roux, D.F. (1997) "Thermal Insulation and Heat Tracing", Guideline presented by D.F. le Roux, Secunda)

$$q = \left[\left(0.548\varepsilon \left[\left(\frac{T_{surf}}{55.55} \right)^4 - \left(\frac{T_{amb}}{55.55} \right)^4 \right] \right) + \left(\left(1.957 |T_{surf} - T_{amb}|^{5/4} \right) \left(\sqrt{2.85V_m} \right) \right) \right] \quad (2.13)$$

$$T_{surf} = T_s - \left[\frac{(r_2 + t_{ins}) \ln\left(\frac{r_2 + t_{ins}}{r_2}\right)}{k_{ins}} \right] [q] \quad (2.14)$$

$$h_0 = \frac{q}{(T_{surf} - T_{amb})} \quad (2.15)$$

برای Cemented Tracing (سیمانی) فرمولهای زیر مشتق شده اند:

$$L_{act} = \frac{(\tan \alpha)(r_1 - r_2)}{\sin\left(\tan^{-1}\left[\frac{(\tan \alpha)(r_1 - r_2)}{c_t}\right]\right)} \quad (2.16)$$

$$Q_{ca} + Q_{cp} = Q_{al} + Q_{pl} \quad (2.17)$$

$$Q_{ca} = (0.992257866nL)(0.4714r_2 - 2\alpha(r_2 + c_t)) \left[\frac{(T_s - T_{amb})^{1.25}}{(r_2 + c_t)^{0.25}} \right] \quad (2.18)$$

$$Q_{cp} = 4q_i nLr_2 (T_s - T_p) \quad (2.19)$$

$$Q_{al} = \frac{2nL(T_{amb} - T_{amb})L_{act}}{\left[\frac{t_{ins}}{k_{ins}} + \frac{1}{h_0} \right]} \quad (2.20)$$

$$Q_{pl} = \frac{L(T_p - T_{amb})(2\pi - (1.25 + 0.75n)\alpha)}{\left[\frac{\ln\left(\frac{r_1}{r_{pinn}}\right)}{k_w} + \frac{\ln\left(\frac{r_{ins}}{r_1}\right)}{k_{ins}} + \frac{1}{h_0} \right]} \quad (2.21)$$

$$c_1 = Q_{ca} - Q_{al} \quad (2.22)$$

$$c_2 = \frac{[2\pi - (1.25 + 0.75n)\alpha]}{\left[\frac{\ln\left(\frac{r_1}{r_{pinn}}\right)}{k_w} + \frac{\ln\left(\frac{r_{ins}}{r_1}\right)}{k_{ins}} + \frac{1}{h_0} \right]} \quad (2.23)$$

$$c_3 = 4nq_i r_2 \quad (2.24)$$

$$T_p = \left(\frac{c_1 + c_3 T_s + c_2 T_{amb}}{c_2 + c_3} \right) \quad (2.25)$$

فرمول زیر برای مشخص کردن گرمترین سطح Cemented Tracing استفاده شده است:

$$T_{surf} = T_s - \left[\frac{(r_2 + c_t + t_{ins}) \ln \left(\frac{r_2 + c_t + t_{ins}}{r_2} \right)}{k_{ins}} \right] [q] \quad (2.26)$$

Where

$$q = \left[\left(0.548 \varepsilon \left[\left(\frac{T_{surf}}{55.55} \right)^4 - \left(\frac{T_{amb}}{55.55} \right)^4 \right] \right) + \left(\left(1.957 (|T_{surf} - T_{amb}|)^{5/4} \right) (\sqrt{2.85 V_m + 1}) \right) \right] \quad (2.27)$$

Refer to [Appendix 2](#) for a table of q_t vs. NPS. (Table 3)

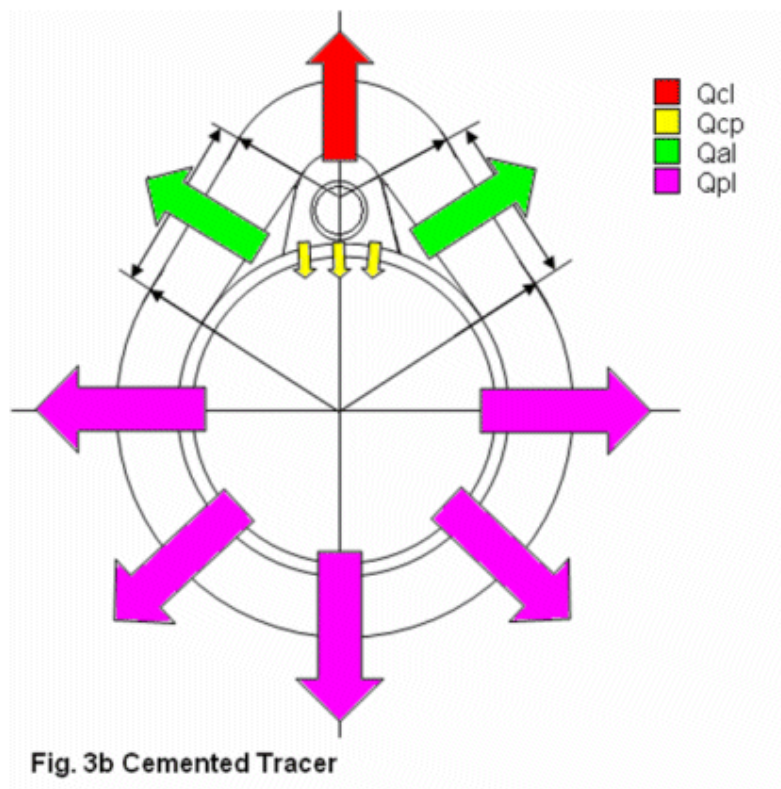
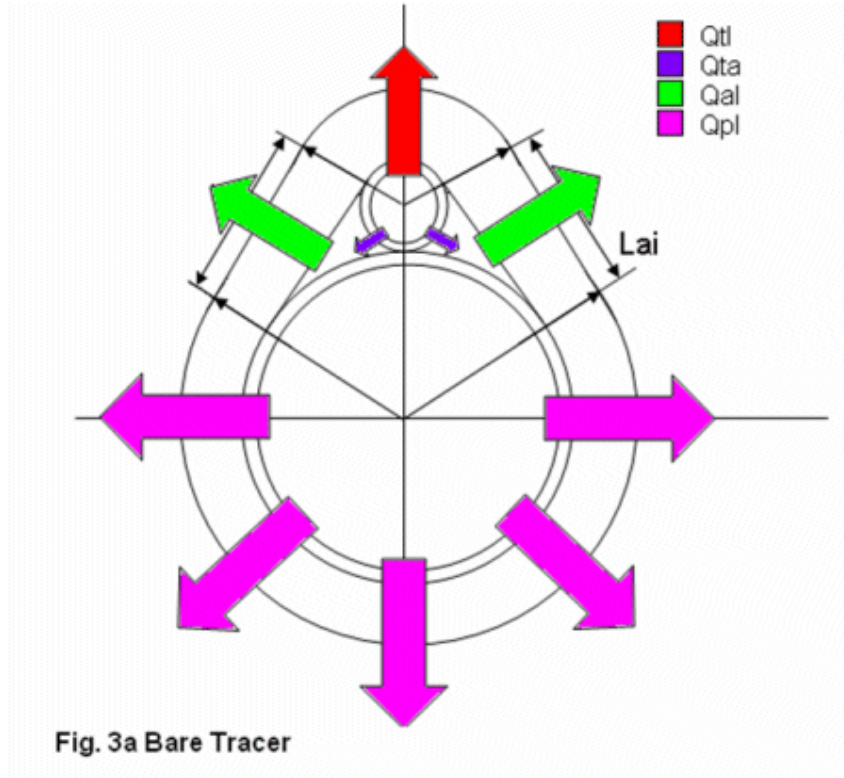
Experimental:

The cross sections of the bare traced and cemented traced pipes are given in figures 3a and 3b, respectively. These figures illustrate how the geometric approach was used in describing the heat loss through the system, taking into account that spherical geometry was not assumed.

تجربی:

سطح مقطع لوله ها در دو روش Bare Traced و Cemented Traced طبق شکل‌های ۳a و ۳b بترتیب داده شده اند. این شکلها نشان می دهند که چگونه سطح هندسی مورد نظر برای اتلاف حرارت در سیستم در نظر گرفته شده و همانطور که مشخص است سطح هندسی کروی برای محاسبات در نظر گرفته نشده است.

مجموعه فنی نوین پارسین



متغیرهای مستقل برای طراحی در قسمت زیر آورده شده اند و همگی متغیرهای مشخص در نرم افزار شبیه سازی می باشند:

- Time, s
- Pipe Length, (0 to maximum length for steam trap), m
- Steam Pressure, (240 to 1700kPa)
- Nominal process fluid pipe size, (0.5 to 48 inches)
- Amount of available tracers (0 to 5)
- Nominal pipe size of tracer pipe, (0.5 or 0.75 inches)
- Insulation thickness, (0 to process fluid pipe diameter), m
- Emissivity of insulation lagging (0 to 1)
- Ambient Temperature, (-10 to 50 °C)
- Wind velocity, (0 to 72km/h)

The dependent variables for the simulation were as follows:

- Annulus Temperature, (Process fluid temperature to Steam Temperature)
- Saturated Steam Temperature, (126.1 to 204.3°C)
- Steam Consumption, (0 to 50kg/h)
- Process Fluid Temperature, (0 to 600°C)
- Pipe Outer Radius, (10.668 to 609.62mm)
- Pipe Wall Thickness, (1.3974 to 15.6869mm)
- Pipe Inner Radius, (6.401 to 1219.2mm)
- Pipe Wall Thermal Conductivity, (16 to 401W/mK)
- Steam Tracer Outside Radius, (6.35 to 9.53mm)
- Maximum Tracer Length, (30 to 60m)
- Thermal Conductivity of insulation (0.01241 to 0.1120 W/mK)
- Average Insulation Temperature, (Ambient temp. to Steam temp.)
- Surface Temperature, (N/A), K
- Surface Film Coefficient, (N/A), W/m²K

یکی از مهمترین مسائل بدست آوردن حداقل دمایی می باشد که سیال پروسه در آن وارد خط لوله می شود ولی اطلاعات دیگر مانند دمای دیواره و میزان مصرف بخار نیز مهم می باشند. Interface طراحی شده برای شبیه سازی در شکل ۳c نشان داده شده است و در Microsoft Excel نوشته شده است.

Steam tracing simulation for determining Process Fluid Temperature	
Author: J.A.B. de Lange	
Assumptions: Saturated Steam is used, pressure drop along length of pipe negligible Resistance to heat transfer through tracer pipe wall material is negligible	
Press F11 to activate the macro that runs the simulation.	
<p>It is extremely important that the references in the Outputs section not be changed, as this will cause the program to respond incorrectly.</p> <p>It is also very important to read the messages at the bottom of the screen each time the simulation has been run, before evaluating the outputs.</p> <p>Save a copy of this simulation beforehand, as it may happen that the simulation enters a cyclic error when some temperatures become hotter than they should, which would be very difficult to rectify.</p>	
Inputs	Outputs
Line Number	123
Pipe Length (m)	40
Steam Specification	Other Information
Steam Pressure (kPa)	400
	Annulus Temperature (°C)
	76.4
Process Fluid Pipe	Steam Information
Pipe NPS (inches)	8"
Pipe schedule	STD
Pipe material	Carbon steel
Minimum allowable fluid temperature (°C)	30.00
	Steam Temperature (°C)
	143.6
	Steam Consumption (kg/h)
	5.59
Steam tracing available	Process Fluid Pipe
Bare/Cemented	Bare
Amount of Available Tracers	1
Tracer NPS (inches)	1/2"
Tracer Pipe Material	Stainless Steel
	Process Fluid Temperature (°C)
	48.88
	Pipe Outer Radius (mm)
	109.54
	Pipe Wall Thickness (mm)
	8.18
	Pipe Inner Radius (mm)
	101.36
	Wall Material Thermal Conductivity, kw, (W/mK)
	53.3
Insulation Specifications	Steam Tracer Information
Insulation Material	Rigid Polyurethane
Insulation Thickness (mm)	35.00
Emissivity of insulation lagging	0.4
	Tracer Outer Radius (mm)
	6.35
	Maximum Tracer Length (m) before steam trap has to be installed.
	40
Ambient Conditions	Spacers Required
Ambient Temperature (°C)	12
Wind Velocity (km/h)	10.8
	Insulation Information
	Thermal Conductivity, k(ks), (W/mK)
	0.02712
	Temperature Range (°C)
	10 to 650°C
	Average Insulation Temperature (°C)
	36.67
	Outer Surface Information
	Hottest Outside Surface Temperature (°C)
	57.51
	Surface Film Coefficient, ho, (W/m²K)
	10.1
Messages	
<p>Solution converged to a satisfactory degree</p> <p>Hottest Surface Temperature Acceptable for Personnel Protection</p> <p>Pipe Length Acceptable</p> <p>Insulation thickness acceptable, but refer to message 2 for further information</p> <p>Steam pressure acceptable</p> <p>Process Fluid Temperature acceptable, and above Minimum Allowable Fluid Temperature</p>	

طراحی جزئیات و محاسبات در [Appendix 1](#) آورده شده اند. طراحی طی یک شیوه ی غیر قراردادی و در جهت بکارگیری هر چه بیشتر فرضها انجام شده است. بیشتر معادله ها بصورت پایه ای بدست آمده اند، در عین حال بعضی از معادله ها از منابع معرفی شده بدست آمده اند. تمامی معادلات لازم برای جلوگیری از ابهام بسط داده و بصورت ساده در آورده شده اند. سپس معادلات بصورت همزمان و با استفاده از تکرار حل شده اند. برای جلوگیری از ابهام در مورد اینکه کدام ورودی و کدام خروجی می باشد قسمت ورودی به شبیه ساز در جدول بالا به رنگ زرد در سمت چپ صفحه و خروجی ها به رنگ آبی در سمت راست صفحه به چشم می خورد.

قسمت ورودی بیشتر بصورت منوی باز شو می باشد که بدین ترتیب کار وارد کردن داده ها را راحت می کند. همچنین از تکنیکهای ارجاع دهنده به مقادیر لازم در محاسبات در این قسمت استفاده شده است. برای مثال شخص استفاده کننده کفایت تا NPS و Sch No لوله ی سیال مورد نظر را انتخاب کند تا برنامه بصورت اتوماتیک قطر خارجی، قطر داخلی و ضخامت لوله را از جدولی که مقادیر دقیق استاندارد برای سایزهای لوله را دارد بدست آورد.

همچنین شخص استفاده کننده فقط کفایت نوع و جنس مواد عایق، فشار بخار، دمای محیط که برنامه برای محاسبه ی دمای متوسط عایق بکار برده و مقادیر مختلف برای k ها را جایگزاری کند تا قابلیت رسانایی حرارتی مشخص در دمای مشخص (با توجه به اینکه قابلیت رسانایی تابعی از دما می باشد) را بدست آورد. برنامه همچنین قابلیت انتشاربعدی (Lagging Emissivity) را همراه با دمای محیط، دمای سطح و سرعت باد بکار برده تا مقدار دقیق ضریب سطحی بیرونی را بدست آورد که لازم است بسیار دقیق باشد. برنامه همچنین قادر به محاسبه ی حداکثر دمای سطحی می باشد تا خطری متوجه پرسنل نگردد با توجه به اینکه طبق استاندارد دمای سطحی نباید از ۶۰ درجه سانتیگراد تجاوز کند. دماهای بیشتر از این باعث صدمه دیدن کارگران در اثر تماس با خط لوله خواهند شد.

میزان مصرف بخار نیز با مشخص کردن تلفات حرارتی از سیستم برای طول مشخصی از لوله محاسبه گردید. بخار بصورت تغییر ناپذیری تابع اتلاف حرارت می باشد و در نتیجه تابع چگالش، هنگامیکه مقدار مشخصی از حرارت از بین برود. و این با حداکثر طول Tracer رابطه دارد. بخار تازه (Fresh) و اشباع سپس به سیستم باز می گردد. برای تضمین عملیات موءثر یک تله بخار (Steam Trap) در آخر حداکثر طول موءثر لوله باید نصب گردد تا تمامی چگالشی را که شکل گرفته در خود جمع کند. این مایع چگالیده ممکن است مجدد برای تهیه ی بخار بکار رود.

از شبیه سازی های با مقادیر مختلف می توان استفاده کرد تا برنامه بصورت اتوماتیک محاسبات لازم برای رسیدن به جواب نهایی را انجام دهد و تمام اینها فقط نیاز دارد تا کاربر کلید shortcut را بزند تا به سادگی محاسبات انجام شوند.



مجموعه فنی نوین پارسیان